

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

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ МАЛОПОТУЖНОЇ ВІТРОВОЇ ТУРБИНИ ДЛЯ  
ЖИВЛЕННЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Беднаровський А.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

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)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Тарасенко М.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« » 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Беднарівському Андрію Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування мікромережі постійного струму малопотужної вітрової турбіни для живлення побутових споживачів

Керівник роботи д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1040.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.12.2023

3. Вихідні дані до роботи Розробити проект мікромережі постійного струму для побутових споживачів. Основне живлення забезпечити від малопотужної вітрової турбіни.

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

1. Мікромережі постійного струму

2. Малі вітрові турбіни

3. Автономна ВЕУ в мікромережах постійного струму

4. Синхронний генератор з постійними магнітами у ВЕУ

5. Мікромережа постійного струму на основі МВТ з керуванням Р&О МРРТ

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

1. Мікромережа постійного струму

2. Віротурбіни

3. Трифазний мостовий випрямляч

4. МВТ в мікромережі постійного струму

5. Мікромережа постійного струму на основі МВТ з використанням Р&О керуванням

6. Підвищувальний перетворювач з контролером Р&О МРРТ

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Клепчик В.М., ст. викладач кафедри ХО</i>		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 10.11.2023 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 10.11.2023 по 14.11.2023	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 15.11.2023 по 10.12.2023	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	з 11.12.2023 по 13.12.2023	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 13.12.2023 по 14.12.2023	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 15.12.2023 по 17.12.2023	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 18.12.2023 по 20.12.2023	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 21.12.2023 по 25.12.2023	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

*Беднаровський А.С.*  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

*Тарасенко М.Г.*  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 89 сторінок, 18 аркушів презентації, 47 ілюстрацій, 5 таблиць та 27 використаних першоджерел.

**Об'єкт дослідження** – процес перетворення енергії вітру у електроенергію та її подальший розподіл .

**Предмет дослідження** – мікромережа постійного струму, у складі якої функціонує малий вітрогенератор.

**Метою кваліфікаційної роботи є:** розробка автономної мікромережі постійного струму на основі віротурбіни потужністю 3 кВт для забезпечення електроживлення побутових приладів.

Робота присвячена проектуванню та моделюванню мікромережі постійного струму невеликої вітрової турбіни для забезпечення електроенергією побутового навантаження у разі дефіциту або перебоїв в електропостачанні. Розроблена система включає з невелику вітрову турбіну. Енергія від неї випрямляється за допомогою трифазного діодного випрямляча. На виході випрямляча був підключений конденсатор ланки постійного струму для підтримки стабільної напруги. Підвищувальний перетворювач подає живлення на навантаження постійного струму, підключене до його вихідних клем. Для отримання максимальної потужності та керування вихідною напругою підвищувального перетворювача для керування комутаційним елементом було використано скоригований алгоритм P&O MPPT, який забезпечує швидке відстеження MPPT та підтримання постійної напруги незалежно від зміни швидкості вітру.

*Ключові слова: МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ*

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	9
1.1 Мікромережі постійного струму .....	9
1.2 Робота мікромереж постійного струму в ізольованому режимі.....	12
1.3 Малі вітрові турбін.....	13
1.4 Компоненти малих вітрових турбін .....	17
1.5 Висновки до розділу .....	23
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	
2.1 Особливості генерування електроенергії в мікромережі постійного струму .....	24
2.2 Автономна ВЕУ в мікромережах постійного струму.....	25
2.3 Вибір місця для розміщення МВТ.....	26
2.4 Технології МВТ.....	27
2.5 Характеристики МВТ .....	29
2.6 Малі вітрогенератори зі змінною швидкістю .....	31
2.7 Синхронний генератор з постійними магнітами (СГПМ) .....	33
2.8 Перетворювачі потужності для МВТ.....	35
2.10 Підвищувальний перетворювач постійного струму.....	37
2.12 Мікромережа постійного струму на основі МВТ з керуванням Р&О МРРТ .....	39
2.13 Реалізація МРРТ для підвищувального перетворювача постійного струму .....	41
2.14 Висновки до розділу .....	43
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ .....	44
3.1 Опис мікромережі .....	44
3.2 Профіль навантаження .....	45
3.3 Розробка моделі.....	46
3.3.1 Аеродинамічне моделювання вітрової турбіни .....	46
3.3.2 Моделювання СГПМ .....	49
3.3.3 Динамічна модель ПМСГ.....	49
3.4 Моделювання силової електроніки .....	51

3.4.1 Моделювання перетворювача змінного струму в постійний.....	51
3.4.2 Підвищувальний перетворювач постійного струму в постійний.....	52
3.4.2.1 Конструктивні особливості.....	52
3.4.2.2 Залежність між напругою і струмом.....	53
3.4.3 Пульсації напруги.....	57
3.5 Керування підвищувальним перетворювачем для отримання максимальної потужності.....	58
3.6 Стратегія керування методом збурення та спостереження.....	59
3.7 Загальний опис блок-схеми вітроенергетичної системи.....	64
3.7.1 Модель малої вітрової турбіни.....	66
3.7.2 Модель електричної системи.....	66
3.7.3 Імітаційна модель керування.....	66
3.8 Результати моделювання.....	67
3.8.1 Результати роботи вітрової турбіни.....	67
3.8.2 Результати моделювання МВТ.....	69
3.8.3 Аналіз результатів роботи підвищувального перетворювача постійного струму.....	72
3.9 Висновки до розділу.....	77
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	
4.1 Вплив шуму на організм людини та розробка заходів щодо його зниженню до допустимих величин.....	79
4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки.....	80
4.3 Цивільний захист на об'єкті енергетики.....	82
4.4 Організація оповіщення персоналу об'єктів та населення про НС техно-генного і природного характеру.....	83
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>85</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>86</b>

## ВСТУП

### Актуальність теми.

Внаслідок екологічних проблем, вичерпання викопного палива та зростання попиту на енергію, проникнення відновлюваних джерел розширюється з кожним днем. Однак, через свою залежність від погодних умов, відновлювані джерела створюють нові виклики для енергосистеми. Для того, щоб інтегрувати ці джерела в традиційну енергосистему, необхідно змінити структуру енергосистеми. Концепція мікромереж розглядається як відповідне рішення для інтеграції відновлюваних джерел в енергосистему. Мікромережі - це невеликі енергосистеми з можливостями управління, що працюють в режимі підключення до мережі та в автономному режимі. Мікромережі можна класифікувати як мікромережі постійного струму, змінного струму або гібридні мікромережі. Мікромережі постійного струму з'явилися як стійкі рішення, що поєднують в собі як зберігання енергії, так і розподілену генерацію для забезпечення електроенергією навантажень постійного струму, таких як світлодіодні ліхтарі, комп'ютерні зарядні пристрої, електромобілі, комп'ютери, ноутбуки, телевізори, планшети, телефони, принтери тощо. У даній кваліфікаційній роботі розглядається мікромережа постійного струму на основі малої вітрової турбіни.

Мікромережі постійного струму мають наступні переваги над традиційними електромережами змінного струму, зокрема:

- Підвищена ефективність: Мікромережі постійного струму усувають необхідність перетворення енергії з постійного струму в змінний, що призводить до вищої ефективності та менших втрат енергії.

- Більша гнучкість: Мікромережі постійного струму можуть включати широкий спектр джерел енергії та технологій зберігання енергії, що забезпечує більшу гнучкість та адаптивність.

- Підвищена надійність: Мікромережі постійного струму можуть працювати незалежно від основної електромережі, забезпечуючи резервне живлення в разі відключення електроенергії або інших збоїв.

- Нижчі витрати: Мікромережі постійного струму можуть бути встановлені за нижчою вартістю порівняно з традиційними електромережами змінного струму, особливо у віддалених або автономних районах.

Отже технологія постійного струму має очевидні технічні переваги у світі, де домінують локальні системи зберігання енергії, акумулятори, електромобілі, світлодіодне освітлення, фотоелектричні модулі, цифрове обладнання та енергоефективні системи опалення, вентиляції та кондиціонування. Впровадження технології постійного струму підвищить ефективність перетворення та можливості передачі енергії, одночасно знижуючи інвестиційні та експлуатаційні витрати.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є: розробка автономної мікромережі постійного струму на основі вітротурбіни потужністю 3 кВт для забезпечення електроживлення побутових приладів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести огляд роботи мікромереж постійного струму.
2. Проаналізувати алгоритми відстеження точки максимальної потужності вітрових турбін.
3. Розробити модель мікромережі постійного струму малої вітротурбіни.
4. Розробити модель мікромережі постійного струму малої вітрової турбіни в MATLAB Simulink.

**Об'єкт дослідження** – процес перетворення енергії вітру у електроенергію та її подальший розподіл.

**Предмет дослідження** – мікромережа постійного струму, у складі якої функціонує малий вітрогенератор.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Дістав подальший розвиток підхід до моделювання електромережі, до якої входять вітрогенератор на основі синхронного генератора з постійними



магнітами, діодний випрямляч і підвищувальний перетворювач постійного струму.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Мікромережі постійного струму є практичним рішенням, що включає в себе зберігання енергії та розподілену генерацію для забезпечення живлення різних типів навантажень постійного струму, включаючи світлодіодні ліхтарі, електромобілі, комп'ютери, ноутбуки, телевізори, планшети, телефони, принтери тощо. Крім того, системи постійного струму стають ефективним рішенням для промислового використання. Енергогенеруючі установки на основі відновлювальних джерел енергії, такі як фотоелектричні панелі та паливні елементи, можуть бути легко інтегровані з системами постійного струму.

**Апробація.** Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 6-7 грудня 2023 року. ТНТУ [1]

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (27 найменувань) .

Загальний обсяг текстової частини – 90 сторінок, 5 таблиць, 47 рисунків.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Мікромережі постійного струму

Мікромережі постійного струму з'явилися як стійкі рішення, що поєднують як зберігання енергії, так і розподілену генерацію для забезпечення живлення таких навантажень постійного струму, як світлодіодні лампи, комп'ютерні зарядні пристрої, електромобілі (ЕМ) [2], комп'ютери, ноутбуки, телевізори, планшети, телефони, принтери тощо. Більшість сучасних досліджень зосереджені на мікромережах змінного струму через досвід роботи зі змінним струмом, однак постійний прогрес у силовій електроніці та вдосконалення обчислювальних потужностей систем реального часу зробили енергію постійного струму здатною виконувати більші ролі, ніж просто базове керування. Більше того, технології постійного струму стають привабливими рішеннями для промислових застосувань, таких як центри обробки даних, телекомунікаційні станції, швидка зарядка електромобілів (ЕМ), будівлі з нульовим споживанням електроенергії, залізниці, електричні кораблі тощо. На рис.1.1 [3] зображено макет мікромережі постійного струму, що складається з декількох наномереж [4].

У системах постійного струму такі проблеми, як управління реактивною потужністю та синхронізація частоти, характерні для систем змінного струму, не мають значення. Більше того, відсутність частоти робить системи постійного струму вільними від ефекту близькості, скін-ефекту та проблем з кидками струму і гармоніками. Системи постійного струму також вважаються безпечнішими, ніж системи змінного струму, завдяки зменшенню електромагнітного поля.

Відновлювані генератори, такі як фотоелектричні та паливні елементи, можуть бути легко інтегровані з системами постійного струму, оскільки їх вихідний струм є постійним, тоді як джерела енергії, такі як вітрогенератори, хвильова енергія та газові турбіни, можуть бути більш ефективними, якщо

використовувати лише один перетворювач замість двох послідовних перетворювачів (змінного струму в постійний і постійного струму в змінний). Таким чином, складність системи може бути покращена, а втрати при перетворенні зменшені за рахунок уникнення непотрібних етапів перетворення. Окрім своїх переваг, системи постійного струму також мають деякі проблеми, такі як зрілість технології, відсутність стандартів або норм, нестабільність через невідповідність імпедансу між фільтрами з легким демпфуванням на стороні джерела та жорстко регульованим перетворювачем потужності, дослідження належного заземлення тощо.

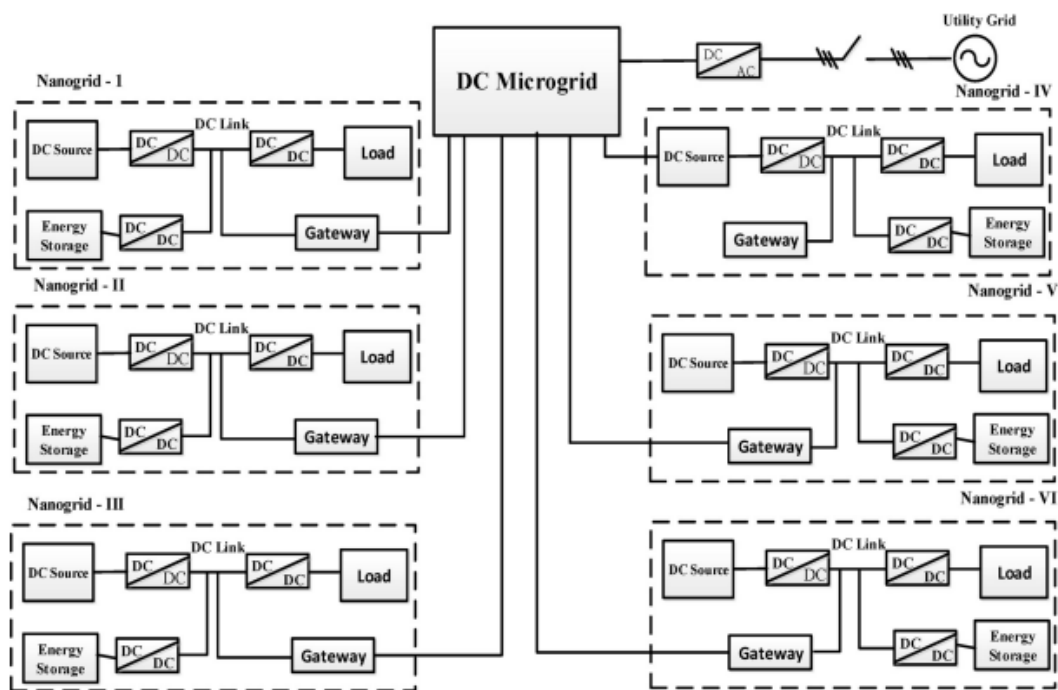


Рисунок 1.1 - Наномережі, що утворюють мікромережу постійного струму [2]

На рис. 1.2 показана схема мікромережі постійного струму з вітротурбіною. Система включає такі компоненти, як вітрова турбіна, пристрій контролю електроенергії, який складається з силових електронних перетворювачів, і контролер MPPT для регулювання енергії від вітрової турбіни до навантаження.

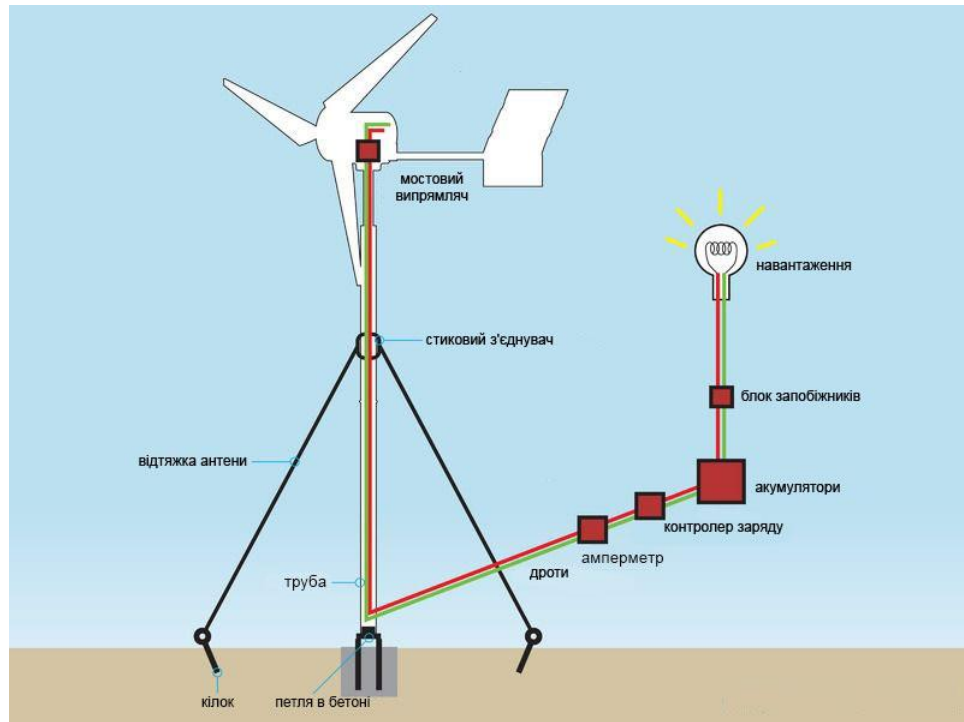


Рисунок 1.2 - Невелика вітрова турбіна, що формує мікромережу постійного струму

Кінетична енергія вітру перетворюється в механічну енергію за допомогою лопатей ротора вітрогенератора. Потім механічна енергія перетворюється в електричну за допомогою електричного генератора, з'єданого з ротором. Залежно від структури та форми лопатей, генерування енергії вітру відбувається з різною швидкістю обертання [5]. Як правило, вітрова турбіна може видобувати максимальну потужність з вітру при мінливих вітрових умовах.

Нами проведено огляд роботи мікромереж постійного струму в автономному режимі, а також малих вітрових турбін, включаючи їх компоненти та поточний ринок. Також розглянуто принцип перетворення енергії вітру та його експлуатації. Крім того, представлені розділи, присвячені силовим електронним перетворювачам для вітрових турбін, а також стабільності і контролю потоку напруги в порівнянні з іншими методами. Також виконано огляд підходів до керування потужністю вітрових турбін та алгоритми відстеження точки максимальної потужності.

## 1.2 Робота мікромереж постійного струму в ізольованому режимі

Мікромережі складаються з низьковольтних розподільчих систем, що включають розподілені генеруючі установки та накопичувачі енергії. Така система може працювати як з підключенням до електромережі, так і в автономному режимі (offgrid), коли вона від'єднана від електромережі. В автономному режимі мікромережа повинна генерувати достатньо енергії для живлення важливого навантаження [6]. Неважливе навантаження може не підтримуватися, оскільки воно, як правило, залежить від основної електромережі. Як тільки підключення до електромережі буде відновлено, це навантаження будуть знову підключене, і мікромережа знову працюватиме, прив'язана до електромережі. Кількість одиниць розподіленої генерації в мікромережі визначається кількістю енергії, яку необхідно зберігати [7], та навантаженням. У випадку надлишку енергії, коли мікромережа працює в ізольованому режимі, деякі з блоків розподіленої генерації можуть бути зупинені, щоб решта працюючих блоків могли лише задовольнити навантаження.

Більшість побутових приладів працюють на постійному струмі, який зазвичай забезпечується або батареєю, або перетворенням змінного струму в постійний за допомогою випрямляча. На рис. 1.3 показана мікромережа постійного струму, що складається з розподілених генеруючих установок змінного та постійного струму, а також навантажень змінного та постійного струму. Таку топологію часто застосовують, щоб уникнути втрат електроенергії на декількох етапах перетворення енергії. У цьому випадку вітрова турбіна генерує змінний струм, який потребує перетворення змінного струму в постійний для підключення до шини постійного струму, в той час як система зберігання енергії та фотоелектричні панелі забезпечують постійний струм і підключаються до шини постійного струму за допомогою перетворення постійного струму в постійний [8,9].

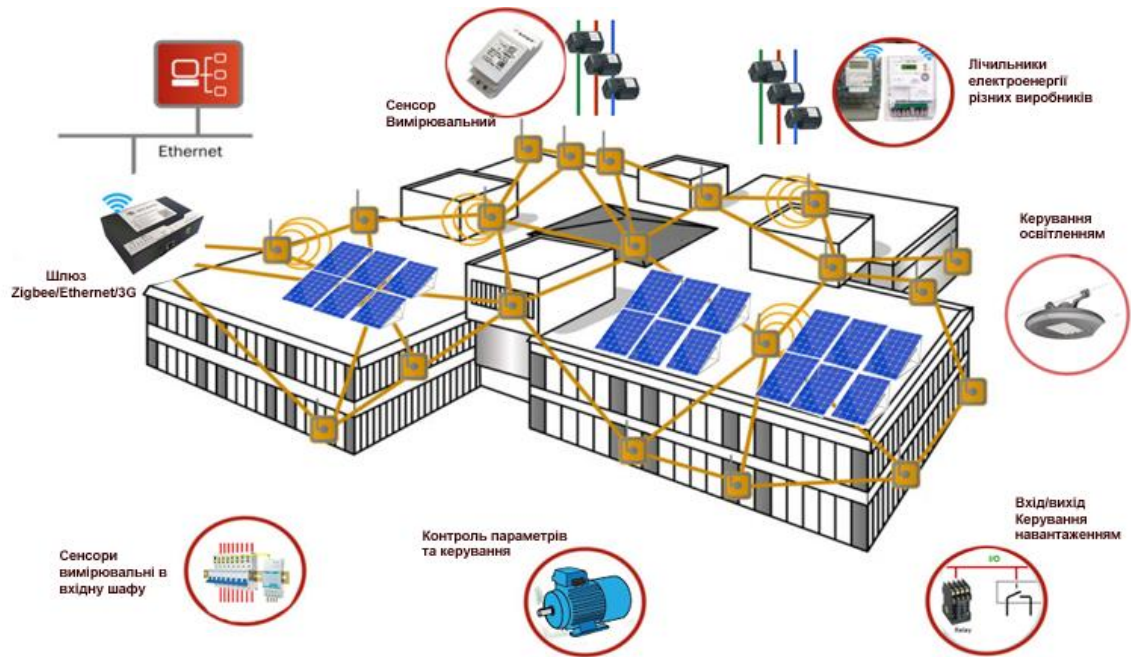


Рисунок 1.3 - Мікромережа постійного струму

### 1.3 Малі вітрові турбіни

Малі вітрові турбіни (МВТ)- це типи вітрових турбін, які генерують лише кілька кіловат енергії (від 1 кВт до 100 кВт) і часто встановлюються як окремі одиниці. Зазвичай вони підключаються безпосередньо до навантаження або, як правило, до зарядного пристрою, такого як акумуляторна батарея [10]. В останні роки спостерігається значне зростання використання сонячних електростанцій; великі компанії вважають економічно вигідним виробляти власну електроенергію. Крім того, у віддалених районах сонячні електростанції часто інтегруються в місцеві мікромережі змінного або постійного струму, що складаються з відновлюваних та інших традиційних джерел енергії, для забезпечення електроенергією домогосподарств, ферм, шкіл, малих підприємств тощо. Ці мікромережі розглядаються як надійний та ефективний засіб для збільшення проникнення малої відновлюваної енергетики при мінімізації витрат. Основний підхід до проектування цих типів вітрових турбін подібний до підходу до проектування великих вітрових турбін. Найважливішим фактором при плануванні встановлення вітрової турбіни є оцінка того, чи

достатньо вітру в даному місці для виробництва електроенергії, оскільки вихідна потужність вітрової турбіни прямо пропорційна швидкості вітру.

На ринку можна знайти дві топології ВЕУ, а саме: вітрові турбіни з горизонтальною віссю (ГВГУ) та вітрові турбіни з вертикальною віссю (ВВГУ) (рис. 1.4). ВЕУ домінують у більшості застосувань вітрових турбін. Вони складаються з вежі, гондоли і лопатей ротора. Гондола містить редуктор і генератор. Силовий електронний інтерфейс невеликої горизонтальної вітрогенераторної установки (ГВГУ) часто розміщується біля основи вежі. З іншого боку, ВВГУ зазвичай складаються з башти, поворотних лопатей і основи ротора, яка включає генератор і редуктор. Їх можна додатково класифікувати на ротор Дар'є і ротор Н-Darrieus (рис. 1.5) [11]). У таблиці 1.1 наведено порівняння між типами вітрових турбін. Загалом, ГВГУ мають кращу ефективність перетворення енергії вітру порівняно з ВВГУ, інші переваги включають можливість самозапуску та швидкий доступ до вищої швидкості вітру завдяки висоті вежі [12].

### Типи вітроелектричних установок

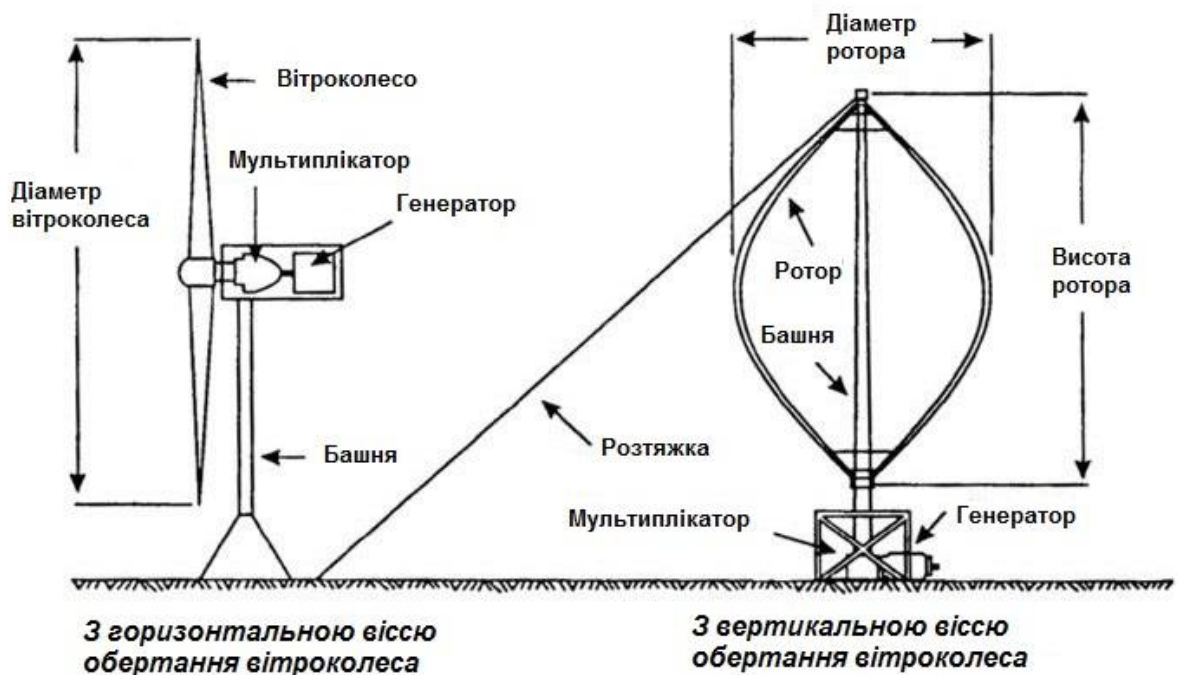


Рисунок 1.4 - Характеристики ГВГУ та ВВГУ



Рисунок 1.5 – Вітротурбіни ВВГУ

Таблиця 1.1 - Переваги та недоліки різних вітрових турбін [14])

Тип вітрових турбін	Переваги	Недоліки
ГВГУ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Більшість з них використовують на три лопаті менше, ніж у ВВГУ.</li> <li>- Лопаті ГВГУ є самонесучими на землі, вони просто кріпляться біля основи, а верхня частина легша, що зменшує вартість конструкції</li> <li>- Регулювання кроку може використовуватися для управління енергією кроку, що подається швидкістю вітру, і зупинки турбінної системи, коли це необхідно.</li> <li>- Сучасне масове виробництво в цій системі має нижчу собівартість, ніж в іншій.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Перешкоди від вежі ГВГУ створюють проблеми з шумом</li> <li>- Конструкція є складною, оскільки має механізм рискання і динамічну зупинку</li> <li>- Більше непокритих періодичних навантажень, які можуть скоротити термін служби системи</li> <li>- Зменшення максимальної вихідної потужності через обмеження системи</li> <li>- Складне технічне обслуговування</li> </ul>



## Продовження Таблиці 1.1

<p>ВВГУ Дар'є і Н- rotor</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Оскільки кут контакту з вітровою лопаттю не є життєво важливим для цієї системи, її можна встановлювати в турбулентних і розбіжних з вітром місцях.</li> <li>- Не потрібно контролювати напрямок ротора</li> <li>- Генератор і блок управління розміщені в нижній частині вежі, що висуває високі вимоги до зручності експлуатації, монтажу та обслуговування.</li> <li>- ВВГУ можна встановлювати в житлових районах з низьким рівнем шуму</li> <li>- Завдяки своїй конструкції Дар'є не має великої ваги</li> <li>- Легке виготовлення компонентів</li> <li>- Для цього застосування не потрібна система регулювання ризику, що знижує вартість</li> <li>- Технологія ВВГУ, така як Дар'є, потребує простого фундаменту</li> <li>- Доступна з низькою потужністю, але більш придатна для використання в офшорних технологічних системах</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- В умовах постійних викликів, таких як запуск з низьким крутним моментом при високих кутах вітрової атаки має місце пульсація крутного моменту, що впливає на термін служби приводу, а також на якість вихідної потужності</li> <li>- Потужність лопатей Н-ротора велика, що вимагає більшої кількості використовуваних матеріалів</li> <li>- Лопаті Н-ротора зазнають згинальних моментів, що зменшує розмір вітрової турбіни, оскільки гравітаційне прискорення зменшується зі збільшенням радіусу турбіни при постійній швидкості.</li> <li>- При застосуванні ротора Дар'є регулювання кута нахилу лопатей вважається неможливим</li> <li>- Технічні характеристики лопатей вітрових турбін Дар'є є складними для промисловості</li> </ul>
------------------------------	---	--

ВЕУ можуть бути з фіксованою або змінною швидкістю обертання. Основні відмінності між цими двома типами полягають у тому, як аеродинамічна ефективність ротора буде обмежена для різних швидкостей вітру. Процес перетворення енергії вітру в електроенергію порівняно простий. Однак без належного планування значна частина енергії вітру може бути втрачена даремно.

## 1.4 Компоненти малих вітрових турбін

Компоненти малих вітрових турбін включають ротор, лопаті, хвостову частину і вежу. Вітрові турбіни складаються з лопатей, втулки ротора, валу турбіни, редуктора, валу генератора тощо. Система призначена для перетворення механічної енергії, що генерується вітром, в електричну.

### *Ротор*

Компоненти вітрової турбіни, які акумулюють енергію вітру, називаються лопатями. Котушка ротора зазвичай складається з двох або трьох рівномірно розподілених дерев'яних, склопластикових або сталевих лопатей, які обертаються навколо осі (горизонтальної або вертикальної) зі швидкістю, визначеною швидкістю вітру і конструкцією лопаті. Лопаті з'єднані з центром, а центр прикріплений до основної основи.

### *Конструкція з функцією перетягування і підйому*

Конструкції лопатей працюють за рахунок використання або лобового опору, або підйомної сили. У концепції опору вітру лопаті рухаються під дією вітру. Вітрогенератори, що працюють за принципом лобового опору, розглядаються як системи з низькою швидкістю обертання і високим крутним моментом. Вони можуть використовуватися в таких сферах, як перекачування, різання або шліфування. З іншого боку, конструкція підйомної кромки використовує схоже правило, яке змушує літаки, повітряних зміїв і птахів літати. Коли повітряний потік протікає повз лопать, між верхнім і нижнім сегментами лопаті виникає певна різниця у швидкості та силі вітру. Нижній сегмент має більший тиск і, таким чином, "піднімає" лопать. Коли лопаті приєднуються до головної осі, подібно до ротора вітрової турбіни, підйом перетворюється на обертальні рухи. Вітрогенератори на основі підйому мають вищу швидкість обертання і призначені для виробництва електроенергії.

### *Співвідношення швидкості обертання наконечника*

Швидкість обертання наконечника буде пропорційна обертальному руху лопаті по відношенню до швидкості вітру. При більшому відсотковому співвідношенні швидкості наконечника, обертання ротора реальної вітрогенератора при заданій швидкості вітру буде високим. Вітрогенератори на основі підйомної сили мають максимальне співвідношення швидкості лопаті до швидкості вітру близько 10, в той час як пропорції на основі опору, як правило, є наближеними. Враховуючи високі вимоги до швидкості обертання електричних генераторів, очевидно, що вітрогенератор на основі підйомного механізму є майже практичним.

#### *Кількість лопатей*

Об'єм лопатей складається із загальної кількості лопатей і загальної площі, яку вони займають, щоб полегшити роботу вітрогенератора. Для ефективної роботи підйомної вітрогенератора вітер повинен легко обтікати ці лопаті. Відстань між лопатями повинна бути більшою, щоб запобігти зіткненню певної лопаті з потенційно заважаючою лопаттю і уникнути турбулентності. Тому більшість вітрогенераторів мають дві або три лопаті.

#### *Генератор*

Вітрогенератор перетворює обертання лопатей безпосередньо в електрику. Ці генератори можуть виробляти змінний або постійний струм, залежно від конструкції, і їх можна знайти на ринку з різними стандартними номінальними показниками електричної потужності. Довжина лопатей може впливати на розмір вітрогенератора. Генератори, які виробляють електроенергію змінного струму, часто оснащені функціями для генерування точної напруги на постійній частоті, навіть якщо вона змінюється. Генератори постійного струму, як правило, корисні для зарядки акумуляторів, а також використовуються для інших пристроїв.

#### *Передача енергії*

Обертання ротора вітрової турбіни коливається від 45 до 400 об/хв (обертів за хвилину), залежно від типу ротора і швидкості вітру. Генератори, як правило, потребують обертів на хвилину від 200 до приблизно 800. Отже,

більшість вітрогенераторів потребують системи передач для збільшення швидкості обертання генератора до достатньої для ефективного виробництва електроенергії. Лише деякі вітрогенератори постійного струму не потребують систем передачі. Замість цього вони використовують пряме з'єднання між ротором і генератором, яке зазвичай називають системами прямої тяги. Оскільки передача енергії не здійснюється, складність вітротурбіни та її обслуговування зменшуються. Однак, щоб виробляти таку ж потужність, як вітрогенератори змінного струму, потрібні великі турбіни.

### *Вежі*

Вежі - це не просто опорні рами, на яких встановлюються вітрогенератори. Вони також піднімають вітрову турбіну на певну висоту, щоб лопаті могли безпечно і надійно відриватися від землі, а також щоб вітер був сильнішим. Вибір максимальної висоти вежі в багатьох випадках є не обов'язковим, за винятком районів, на які поширюються обмеження. Основним фактором, який слід враховувати при прийнятті рішення про висоту вежі, є її вартість.

### *Силові електронні перетворювачі для вітрогенераторів постійного струму*

Найпоширенішими силовими електронними перетворювачами для вітрогенераторів є перетворювачі змінного струму в постійний, постійного струму в змінний і постійного струму в постійний. Згенерована напруга спочатку випрямляється в постійний струм для живлення навантажень постійного струму або перетворюється назад в змінний струм для живлення електромережі або будь-якого навантаження змінного струму. Як правило, у вітрогенераторах постійного струму безперервна зміна швидкості вітру впливає на напругу в ланці постійного струму, яка може змінюватися неконтрольовано. Для отримання стабільної напруги постійного струму в ланці постійного струму зазвичай використовується підвищувальний перетворювач постійного струму в постійний.

### *Перетворювачі змінного струму в постійний*

Перетворювачі змінного струму в постійний також відомі як випрямлячі. Трифазний мостовий випрямляч, показаний на рис. 1.6, зазвичай використовується у вітрогенераторах для перетворення змінної напруги в постійну. Топологія випрямляча - це повнохвильовий випрямляч, що забезпечує шість імпульсних пульсацій на вихідній напрузі.

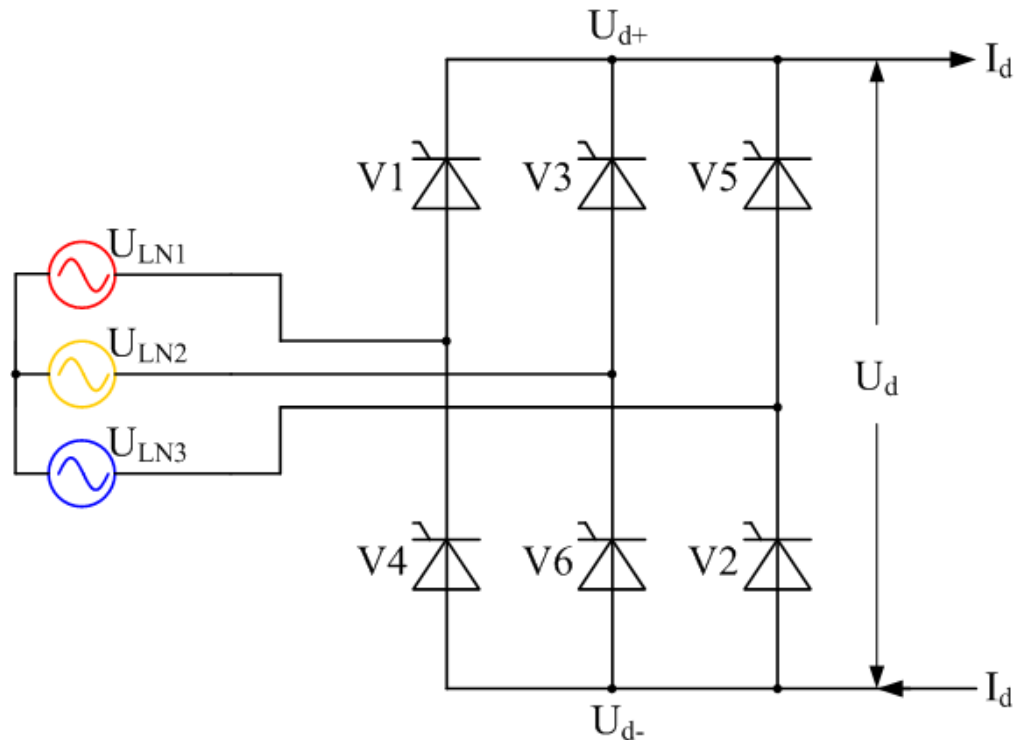


Рисунок 1.6 - Трифазний мостовий випрямляч

### *Перетворювачі постійного струму в постійний*

Перетворювачі постійного струму в постійний - це пристрої, які приймають постійну напругу на вході і виробляють бажану постійну напругу на виході, причому вихідна напруга відрізняється від вхідної. Перетворювачі постійного струму також використовуються для ізоляції шуму і для керування шиною живлення. Загалом, існує три типи перетворювачів постійного струму в постійний, а саме: підвищувальний, понижувальний та підвищувально-знижувальний. Перетворювачі постійного струму складаються з котушки індуктивності, конденсатора, діода та IGBT або MOSFET.

### *Бустерний перетворювач*

На рис. 1.7 зображено принципову схему перетворювача. Цей тип перетворювача приймає високу вхідну напругу і видає низьку вихідну напругу.

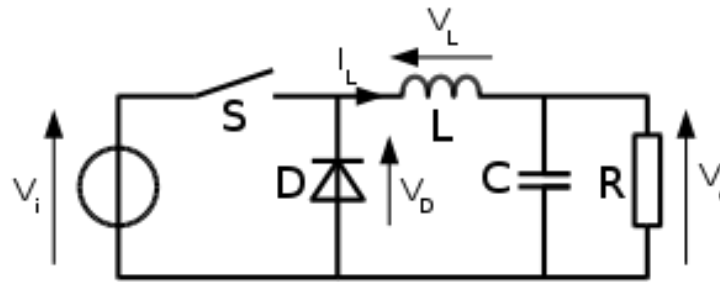


Рисунок 1.7 - Схема перетворювача напруги

Якщо перемикач SW знаходиться у включеному стані, напруга на котушці індуктивності дорівнює різниці напруг між входом і виходом, а струм через котушку індуктивності лінійно зростає. Діод буде в режимі зворотного зміщення, і струм через нього не буде протікати. З іншого боку, якщо перемикач SW знаходиться у вимкненому стані, діод буде зміщений вперед, а напруга на котушці індуктивності буде від'ємною і дорівнюватиме вихідній напрузі. Отже, струм котушки індуктивності зменшиться.

Наступне рівняння дає вихідну напругу бакперетворювача:

$$V_o = DV_{in} \quad (1.1)$$

де  $V_o$  - вихідна напруга;

$V_{in}$  - вхідна напруга;

$D$  - робочий цикл перетворювача.

#### *Підвищувальний перетворювач*

Підсилювальний перетворювач, показаний на рис. 1.8, приймає вхідну напругу постійного струму і забезпечує вихідну напругу, більшу за вхідну. Зазвичай він складається з котушки індуктивності, діода, перемикача і принаймні одного накопичувача енергії. Для усунення пульсацій вихідної напруги на виході перетворювача часто підключаються конденсатори. Коли перемикач (IGBT) знаходиться у включеному стані, струм, що протікає в

катушці індуктивності, збільшується, а коли перемикач знаходиться у вимкненому стані, єдиний шлях для протікання струму в катушці індуктивності - через діод, конденсатор і навантаження, таким чином, дозволяючи конденсатору передавати енергію, накопичену під час включеного стану. Вихідна напруга  $V_o$  підвищувального перетворювача визначається рівнянням (1.2)

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_s, \quad (1.2)$$

де  $V_s$  і  $D$  - вхідна напруга і коефіцієнт завантаження відповідно.

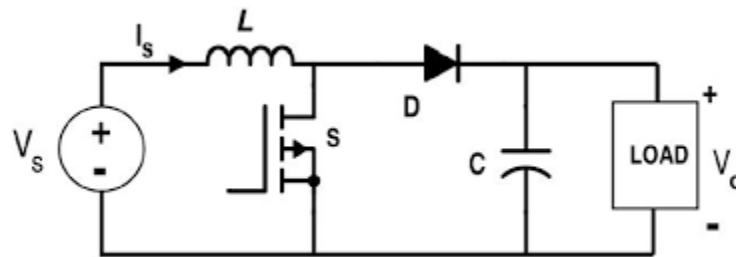


Рисунок 1.8 - Схема підвищувального перетворювача

Деякі з переваг підвищувального перетворювача включають:

- Низьку кількість компонентів, складність і вартість;
- Просту конструкцію і реалізацію;
- Високий ККД і низький вхідний струм пульсацій.

З іншого боку, недоліками є:

- Неізольоване джерело живлення;
- Схильність до виходу з ладу через відсутність ізоляції постійного струму;
- Високі вихідні струми створюють навантаження на комутаційний елемент, діод, і, отже, обмежують вихідну потужність цього джерела;
- Небезпечні перехідні процеси можуть легко досягти навантаження;
- Джерело має високий рівень пульсацій на виході.

*Перетворювач Buck-Boost*

Перетворювач, зображений на рис. 1.9, забезпечує вихідну напругу, яка може бути меншою або більшою за вхідну напругу залежно від значення коефіцієнта завантаження. Цей перетворювач працює таким чином, що якщо коефіцієнт завантаження більше 0,5, перетворювач працює в режимі підвищення, тоді як якщо коефіцієнт завантаження менше 0,5, перетворювач працює в режимі пониження.

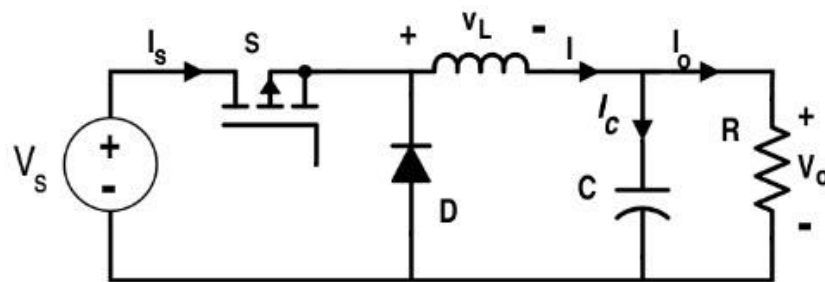


Рисунок 1.9 - Схема підвищувального перетворювача

Вихідна напруга  $V_o$  підвищувального перетворювача може бути визначена за допомогою рівняння (1.3)

$$V_o = \left( \frac{1}{1-D} \right) V_{in} \quad (1.3)$$

де  $V_{in}$  і  $D$  - вхідна напруга і коефіцієнт завантаження відповідно.

## 1.5 Висновки до розділу

1. Проведено огляд роботи мікромереж постійного струму в автономному режимі, а також малих вітрових турбін, включаючи їх компоненти та поточний ринок.
2. Розглянуто принцип перетворення енергії вітру та його експлуатації. Крім того, представлені діні, присвячені силовим електронним перетворювачам для вітрових турбін, а також стабільності і контролю потоку напруги в порівнянні з іншими методами.
3. Виконано огляд підходів до керування потужністю вітрових турбін та алгоритми відстеження точки максимальної потужності.



## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Особливості генерування електроенергії в мікромережі постійного струму

Як правило, ВЕУ складаються з таких компонентів, як ротор зі змінною кількістю лопатей для перетворення енергії вітру в механічну енергію, електричний генератор, системи управління та захисту, а також силовий електронний інтерфейс для подачі електроенергії в акумуляторну батарею, електромережу або для безпосереднього застосування, наприклад, для водяного насоса. Генератор є основним компонентом малої вітрової турбіни і перетворює механічну енергію в електричну. Існує великий інтерес до використання багатополюсних синхронних генераторів з постійними магнітами, що працюють від валу вітротурбіни без системи передач.

Генератор на постійних магнітах не потребує регулювання збудження, а його вихідна напруга пропорційна швидкості обертання ротора. Отже, при управлінні вітрогенератором швидкість обертання ротора отримують шляхом вимірювання вихідної напруги. Безперервна зміна швидкості вітру призведе до неконтрольованої зміни напруги в ланці постійного струму. Щоб отримати роботу зі змінною швидкістю і стабільну напругу на шині постійного струму, в ланці постійного струму можна розмістити підвищувальний перетворювач постійного струму. Оскільки потоки активної потужності від синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) до ланки постійного струму через силовий перетворювач є односпрямованими, для отримання економічно ефективної схеми можна використовувати лише простий діодний випрямляч для перетворювача на стороні генератора [14].

Концепція мікромереж викликає великий інтерес через розвиток технологій відновлюваної енергетики. Мікромережа може бути спроектована таким чином, щоб включати різні типи відновлюваних джерел і накопичувачів енергії, керованих методом спостереження, для забезпечення якісного електропостачання навантажень.

## 2.2 Автономна ВЕУ в мікромережах постійного струму

Як зазначалося раніше, мікромережі постійного струму останнім часом викликають все більший інтерес, оскільки вони не створюють низки технічних проблем у порівнянні з мікромережами змінного струму. Крім того, мікромережі постійного струму забезпечують безперебійний зв'язок між джерелами постійного струму, і, як наслідок, зменшуються втрати електроенергії. Автономна мікромережа постійного струму, прийнята в цьому дослідженні, складається з МВТ з СГПМ, перетворювача змінного струму в постійний, перетворювача постійного струму в постійний, акумуляторної батареї, а навантаження постійного струму може представляти собою світлодіодне освітлення та інші побутові прилади в житловому приміщенні. Наразі не існує стандартного значення напруги. Однак більшість мікромереж постійного струму зазвичай використовують 24 В або 48 В з міркувань безпеки, вимог до акумуляторних батарей, вибору силового перетворювача та підвищеної надійності. Мікромережі постійного струму є рішенням для отримання високої якості електроенергії.

Перетворювачі потужності відіграють важливу роль у мікромережах, оскільки вони з'єднують різні відновлювані генератори і передають енергію між різними компонентами мікромережі. Напівпровідники, включаючи діоди, перемикачі та пасивні компоненти, такі як котушки індуктивності, резистори та конденсатори, є основними елементами силових перетворювачів [15].

На рисунку 2.1 представлено мікромережу постійного струму, що живить навантаження. Ця топологія часто використовується в МВТ, що живлять системи освітлення, а також зарядні станції для електромобілів. Контролер МРРТ використовується для керування перетворювачем потужності для забезпечення максимальної вихідної потужності. Залежно від напруги МВТ, перетворювач потужності може бути як підвищувальним, так і понижувальним. Зазвичай, система також включає в себе накопичувач енергії, який з'єднує шину

постійного струму для живлення навантаження, коли вихідна потужність МВТ коливається через зміну швидкості вітру.

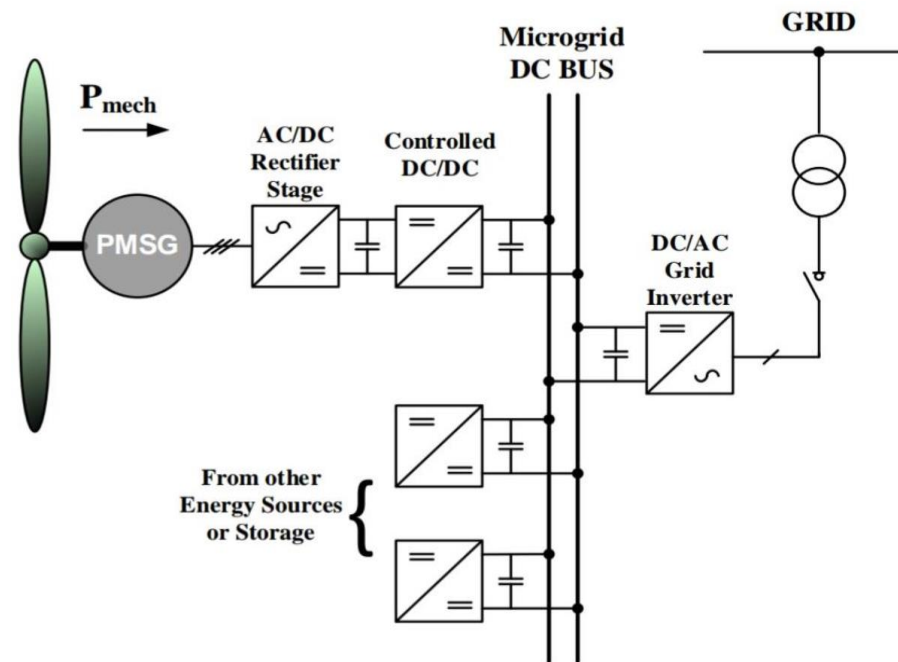


Рисунок 2.1 - МВТ в мікромережі постійного струму

Однією з найбільших проблем стандартизації напруги в мікромережах постійного струму є використання різних рівнів напруги в розподіленій генерації з побутовими, комерційними та промисловими навантаженнями. Наприклад, за відсутності стандартів напруги важко стандартизувати прилади та пристрої, що живляться безпосередньо від мікромереж постійного струму. У Таблиці 2.1 наведено бажані рівні напруги для основних застосувань [3].

### 2.3 Вибір місця для розміщення МВТ

Наприклад, наявність перешкод, таких як великі дерева або високі споруди, може перешкоджати належному потоку повітря, створюючи вихори, які можуть знизити продуктивність будь-якої вітрової турбіни. Вкрай важливо приділити багато уваги вибору місця для зведення споруди для вітрогенератора, розташувати турбіну на мінімальній відстані від навколишніх перешкод, а також прагнути до того, щоб найнижча нижня частина ротора була розташована вище, ніж найвища перешкода. Загалом, вітрова турбіна повинна бути на висоті 9 метрів над будь-яким об'єктом, як показано на рис. 2.2.

Таблиця 3.1 - Застосування постійного струму з бажаним рівнем напруги

№	Застосування	Напруга постійного струму
1	USB та інше невелике електронне обладнання	$\leq 5$
2	Автомобілі, настільні комп'ютери	12
3	Світлодіод, вантажівки, вентилятори	24
4	Майбутні фотоелектричні установки	48
5	Телекомунікації	48
6	Живлення через Ethernet	50
7	Батареї	110/220
8	Центр обробки даних	380
9	Зарядні станції для електромобілів	400
10	Системи розподілу майбутнього для житлових і комерційних будівель	350-450
11	Промисловість і транспорт	600-900
12	Тягові, морські та авіаційні системи	1000-1500

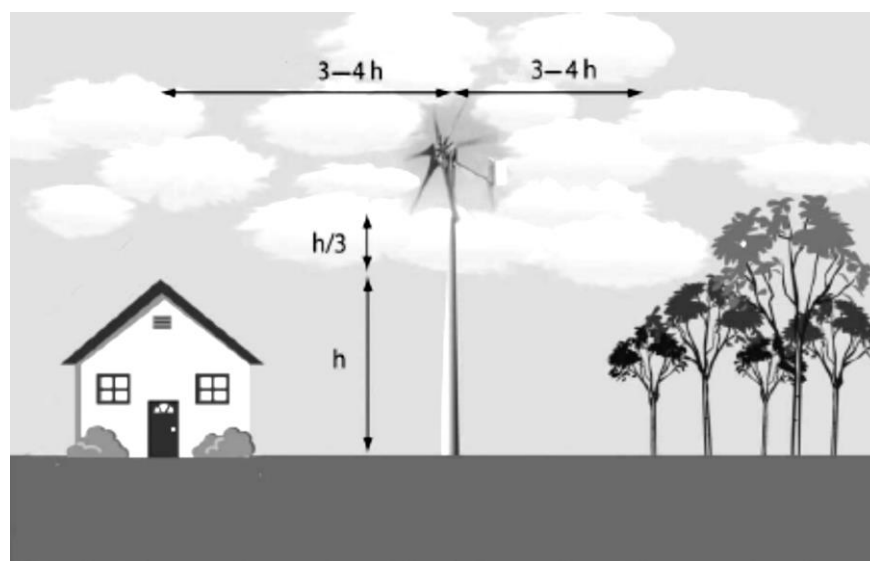


Рисунок 2. 2 - Мінімальні відносні відстані в залежності від висоти перешкод

Крім того, необхідно враховувати довжину проводів, що з'єднують вітрову турбіну з навантаженням, щоб уникнути втрат електроенергії через опір і нагрівання проводів [16].

## 2.4 Технології МВТ

ВЕУ складаються з вітрової турбіни, яка перетворює енергію вітру в механічну енергію. Вал турбіни з'єднаний з валом гідроагрегату через систему передач. Система передач передає номінальний крутний момент на генератор, а генератор розвиває номінальну потужність для живлення навантажень. Типова схема МВТ показана на рис. 2.3.

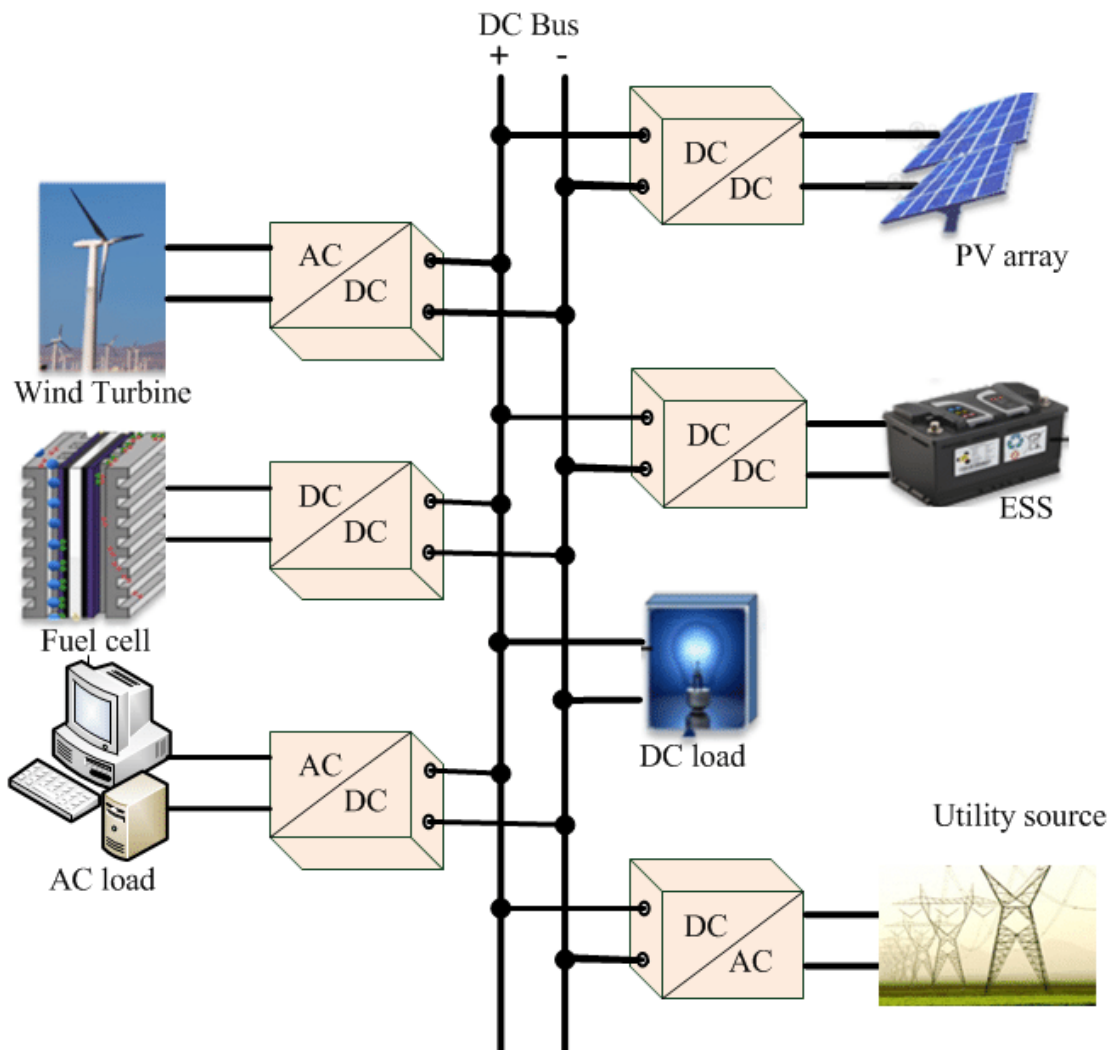


Рисунок 2. 3 - Модель мікромереж постійного струму

### *Горизонтально-осьові МВТ*

Ротори горизонтальної осі МВТ встановлюються перпендикулярно до осі вежі. Таким чином, вісь ротора паралельна осі землі, як показано на рис. 2.4, який включає в себе дві конфігурації ВЕУ, а саме завітряну і противітряну конфігурації.

У навітряних ВЕУ ротор звернений безпосередньо до вхідного вітру, що дозволяє уникнути вітрової тіні за вежею. Навітряні ВЕУ мають певні втрати потужності через перешкоди, оскільки повітря огинає вежу, перш ніж пройти крізь неї. З іншого боку, у навітряних ВЕУ ротор знаходиться на задній стороні турбіни. Гондола спрямована за вітром. Тому немає необхідності в окремій системі рискання. Лопаті ротора гнучкі, оскільки немає небезпеки удару об вежу.

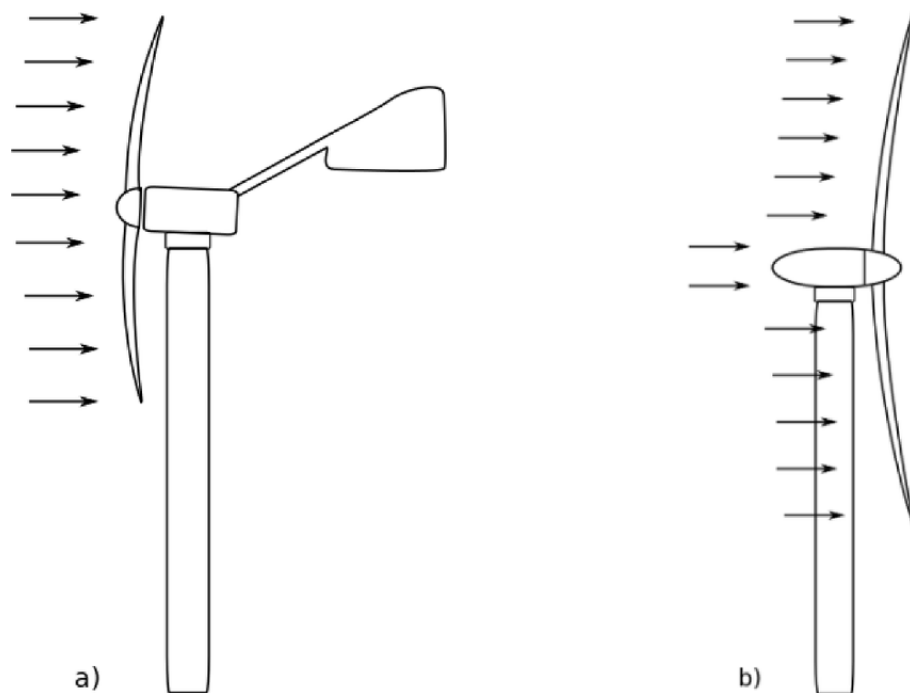


Рисунок 2.4 - Навітряні та підвітряні ВЕУ

## **2.5 Характеристики МВТ**

У МВТ кількість накопиченої кінетичної енергії може бути виражена математично як (2.1):

$$E = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (2.1)$$

де  $\rho$  - густина повітря,

$V_w$  - швидкість вітру,

$A$  - об'єм повітря в поперечному перерізі вітрогенератора.

Поперечний переріз повітря, що взаємодіє з ротором в секунду, дорівнює поперечному перерізу ротора. Аналогічно, товщина повітряного потоку еквівалентна швидкості вітру. Ефективність перетворення близька до 60 %. Її можна розглядати як частину кінетичної енергії, що підводиться до обертової частини, в той час як решта енергії витрачається даремно. Загальна перетворена таким чином енергія математично співвідноситься з коефіцієнтом потужності, який є функцією декількох компонентів, таких як конфігурація лопатей, ротор, налаштування тощо. Таким чином, оптимізований коефіцієнт потужності досягається завдяки точному і правильному розташуванню цих компонентів.

У МВТ кут тангажу приймається рівним нулю. Тому характеристика коефіцієнта потужності залежить від сили тяги, співвідношення швидкості наконечника і крутного моменту на лопатях ротора. Відношення крутного моменту, що генерується, до теоретичного крутного моменту називається коефіцієнтом крутного моменту. Потужність, що генерується ротором, залежить від співвідношення швидкості обертання наконечника. Динаміка між вітровим потоком і ротором впливає на ефективність ротора у видобуванні енергії. Залежність коефіцієнта потужності від швидкості обертання наконечника дає характеристику продуктивності ротора незалежно від розміру ротора та особливостей майданчика. З рис. 2.5 видно, що коефіцієнт потужності зростає зі збільшенням співвідношення частоти обертання наконечника. Однак, коли передаточне число перевищує оптимальне значення, коефіцієнт потужності знижується з тим самим нахилом.

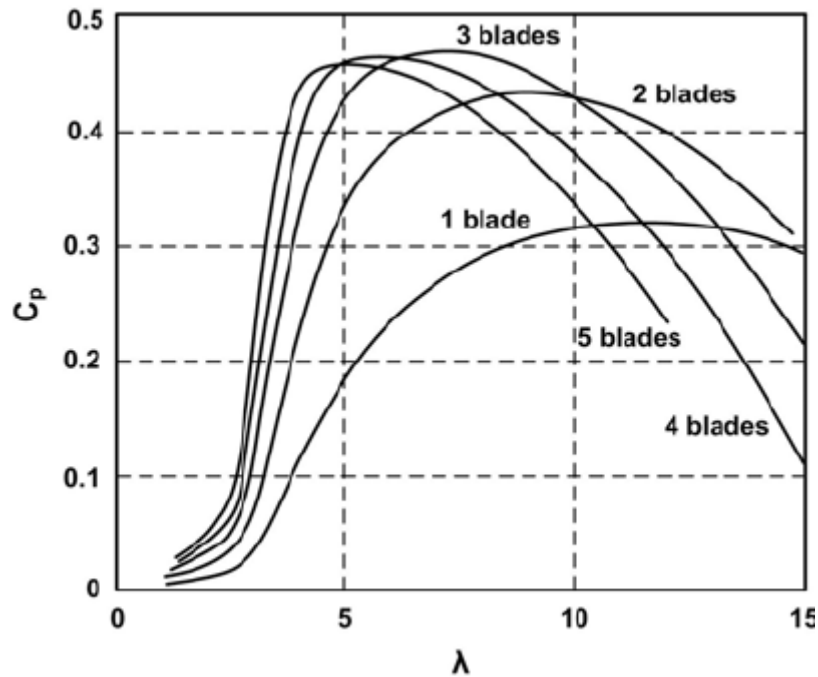


Рисунок 2.5 - Залежність коефіцієнта потужності від частоти обертання наконечника [17]

## 2.6 Малі вітрогенератори зі змінною швидкістю

У малих модулях зі змінною швидкістю генератори опосередковано підключені до електромережі або індивідуальних навантажень через силові електронні блоки, які забезпечують розв'язку та керування системою. Генератором, що використовується в МВТ, є СГПМ. Цей тип генератора компактний, надійний, має високий ККД і не потребує зовнішнього збудження. На відміну від асинхронних генераторів, СГПМ не потребують зовнішніх обмоток для створення потоку ротора; потік машини забезпечується її постійними магнітами [12]. Оскільки СГПМ не потребують громіздких обмоток ротора (як у синхронних генераторах з пораненим ротором) для створення необхідного магнітного потоку, вони можуть бути значно компактнішими. Крім того, структура постійних магнітів СГПМ дозволяє конструкторам вбудовувати в машину більшу кількість магнітних полюсів [12]. Безпосереднім результатом більшої кількості полюсів є те, що ці багатополісні СГПМ можуть працювати на низьких швидкостях. Ці низькошвидкісні багатополісні ВЕУ дозволяють



відмовитися від редуктора, оскільки низькошвидкісний вал турбіни може безпосередньо приводити їх в рух. Відмова від редуктора зменшує загальний розмір і вартість вітротурбінної системи, одночасно підвищуючи надійність. Оскільки вартість матеріалів постійних магнітів постійно знижується, СГПМ також стали привабливими для великих вітрових турбін потужністю МВт. Тому для оцінки запропонованого алгоритму МРРТ і схеми керування потужністю для автономної вітроенергетичної системи для цього дослідження було обрано вітроенергетичну систему на основі СГПМ.

Іншою перевагою роботи зі змінною швидкістю є зменшення навантаження на вали турбіни та зубчасті колеса, оскільки лопаті поглинають піки вітрового моменту під час зміни швидкості обертання ВЕУ. Недоліком роботи зі змінною швидкістю є те, що для виконання вітротурбіною ролі видимого навантаження необхідно використовувати кондиціонер. Однак розвиток силової електроніки допомагає знизити вартість перетворювача електроенергії і підвищує його надійність, в той час як приріст виробництва енергії врівноважує більш високу вартість.

Генератор призначений для роботи в лінійній зоні, що відповідає прямій ділянці кривих крутного моменту генератора за будь-якої швидкості вітру. Крутний момент генератора регулюється на оптимальній кривій крутного моменту, показаній на рис. 2.6, залежно від швидкості генератора. Прискорення або уповільнення генератора визначається різницею між моментом турбіни  $T_m$  і моментом генератора  $T_g$ . Для частоти обертання генератора, меншої за оптимальну, крутний момент турбіни буде більшим за крутний момент генератора, і генератор прискорюватиметься. Для частоти обертання генератора, більшої за оптимальну, генератор буде сповільнюватися. Таким чином, крутний момент турбіни і крутний момент генератора зрівнюються до точки оптимального крутного моменту  $T_{m\_opt}$  при будь-якій швидкості вітру, і вітрова турбіна буде працювати в точці максимальної потужності [18].

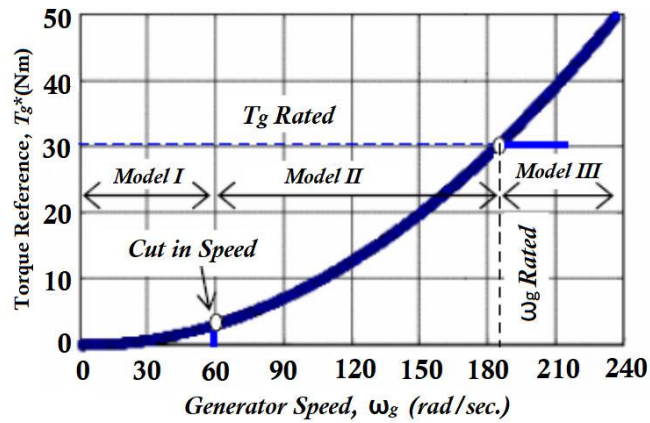


Рисунок 2.6 - Залежність крутного моменту вітрової турбіни від швидкості обертання ротора [18].

## 2.7 Синхронний генератор з постійними магнітами (СГПМ)

Як зазначено вище, в цьому типі генератора поле збудження створюється постійним магнітом, на відміну від котушки в синхронному генераторі. Швидкість ротора і швидкість магнітного поля дорівнює синхронній швидкості. Залежно від конфігурації ротора розрізняють два типи СГПМ: з випуклим полюсом і циліндричним ротором. У роторі з випуклим полюсом потік повітряного зазору змінюється залежно від форми ротора, тоді як у циліндричному роторі величина потоку повітряного зазору залишається постійною. Отже, магнітна міцність і міцність конструкції є кращими у випадку циліндричних роторів. Обмотки вставляються в пази ротора. Циліндричний ротор забезпечує краще динамічне балансування, ніж ротор з випуклими полюсами. Тому він підходить для швидких турбогенераторів. Полюси ротора виступають назовні від центру ротора, тоді як циліндричний ротор використовується в машинах з двома або чотирма полюсами.

Отже, ротор з випуклими полюсами використовується в низькошвидкісних гідрогенераторах. Завдяки постійному потоку повітряного зазору, проникність магніторушійної сили не залежить від полюсів ротора і кута нахилу осі магніторушійної сили. У роторах з гострими полюсами магнітна проникність змінюється залежно від осі магніторушійної сили і кута

нахилу полюсів ротора через зміну потоку в повітряному зазорі. Тому, завдяки ряду переваг, циліндричний ротор є найпоширенішим. Завдяки постійному характеру, моделювання машини та аналіз її роботи є тривіальним. Вираз, що зв'язує частоту генератора і швидкість обертання ротора, має вигляд (2.2) [19].

$$f = \frac{pn_s}{120} \quad (2.2)$$

де  $f$  - частота,  
 $n_s$  - швидкість обертання ротора,  
 $p$  - кількість полюсів.

При підключенні до ізольованого навантаження синхронний генератор діє як джерело напруги, частота якого визначається на основі швидкості його первинного двигуна. Як правило, синхронні генератори підключаються паралельно через лінії електропередач. Очікується, що система зберігатиме синхронність, незважаючи на механічні та електричні навантаження. Перевагами такої взаємопов'язаної платформи є безпека енергопостачання та низька капітальна вартість. Промислове застосування синхронних двигунів пов'язане з роботою на постійній швидкості. Ще однією перевагою використання синхронних двигунів є легке керування коефіцієнтом потужності шляхом зміни струму збудження. Тому більшість галузей промисловості використовують синхронні двигуни як навантаження, що забезпечує високий коефіцієнт потужності.

Крива намагнічування є лінійною, якщо вважати проникність заліза нескінченною. Залежність між магніторушійною силою і потоком на полюси має вигляд [19].

$$\varnothing_f = pF_f \quad (2.3)$$

де  $\varnothing_f$  - потік на полюси.

Обертаючий момент може бути визначений як:

$$T_t = \frac{\pi}{2} \left( \frac{p}{2} \right)^2 \varnothing_f F_f \sin \delta \quad (2.4)$$

де  $\delta$  - кут, на який  $F_f$  відводить  $F_r$ .

Електромагнітний крутний момент діє на полюси поля в напрямку обертання, щоб забезпечити механічну потужність, отже, функціонує як двигун. З іншого боку, якщо вихідна напруга подібна до повітряного зазору електрорушійної сили і її частота підтримується постійною за допомогою зовнішнього трифазного живлення, машина працює як генератор або двигун, виходячи з механічних умов валу. Еквівалентна схема електричної машини, що працює як генератор, показана на рис.2.7.

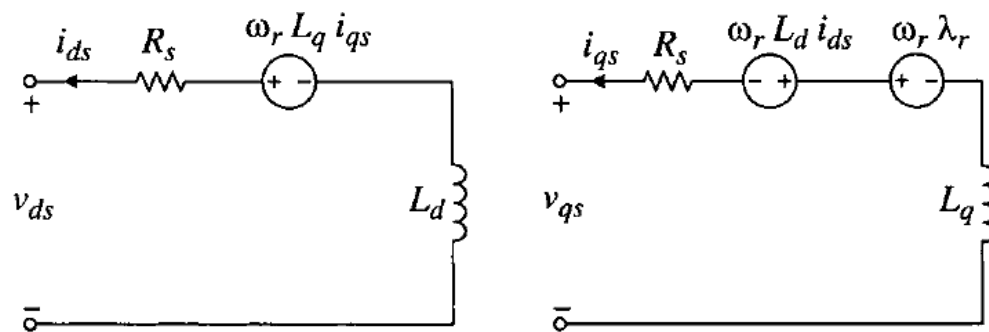


Рисунок 2.7 - Принципова електрична схема СГПМ

## 2.8 Перетворювачі потужності для МВТ

Запропоновані різні топології перетворювачів потужності для МВТ. Однак всі вони мають свої переваги та недоліки. Найпоширенішою топологією, що використовується в МВТ для перетворення змінного струму в постійний, є односпрямований фазовий діодний випрямляч. Трифазний діодний випрямляч у поєднанні з перетворювачем постійного струму в постійний часто обирають замість топології активного випрямляча через нижчу вартість схеми, меншу складність контролера та вищу надійність. Перетворювач постійного струму в постійний використовується для досягнення максимального вилучення потужності. На рис. 2.7 показано МВТ зі змінною швидкістю з силовим електронним перетворенням, пов'язаним з навантаженням постійного струму.

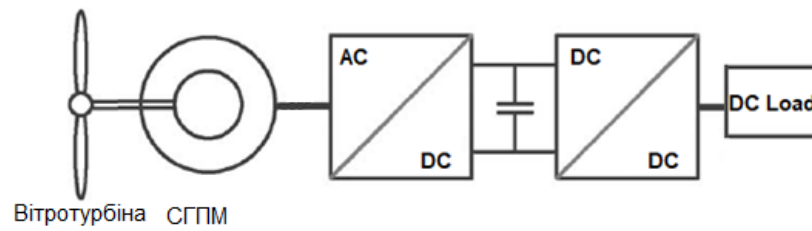


Рисунок 2.8 - Перетворювач потужності, що з'єднується з вітрогенератором

## 2.9 Трифазний діодний випрямляч

Трифазні діодні випрямлячі зазвичай використовуються для перетворення змінного струму, виробленого генератором, у відповідний йому постійний струм. Конденсатор слугує фільтром напруги. Як правило, випрямлячі складаються з таких елементів, як діоди, IGBT, MOSFET і тиристори. Випрямлячі, побудовані на діодах, називаються некерованими випрямлячами.

Випрямлячі поділяються на напівхвильові та повнохвильові. Напівхвильовий випрямляч випрямляє або додатній, або від'ємний півперіод змінного струму. На відміну від нього, повнохвильовий випрямляч випрямляє як додатній, так і від'ємний цикли вхідної хвилі змінного струму. На рис. 2.8 зображено повнохвильовий випрямляч з трьома діодами, який отримує живлення змінного струму від МВТ за допомогою СГПМ.

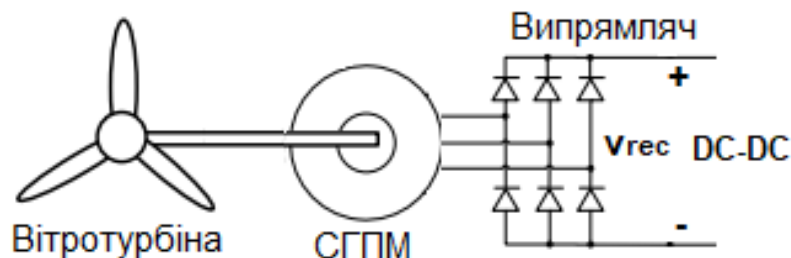


Рисунок 2.9 - СГПМ підключений до трифазного діодного випрямляча

Як правило, трифазний діодний випрямляч складається з двох наборів діодів. Один набір підключається до додатного виходу постійного струму, а інший - до від'ємного клеми виходу постійного струму. Попередній набір

діодів знаходиться у включеному стані протягом додатного напівперіоду, в той час як останній набір діодів вмикається протягом другого напівперіоду.

Конструкція некерованих мостових випрямлячів передбачає правильний підбір діодів для отримання правильної напруги блокування, яка відноситься до максимальної зворотної напруги, яку можуть витримати діоди, що входять до складу випрямляча. Крім того, діоди повинні бути підібрані таким чином, щоб витримувати максимальний струм провідності навіть у разі перенапруги. Струм провідності - це струм, який проходить через діод, коли він зміщений вперед. Крім діодів, такий випрямляч повинен включати згладжуючий фільтр для отримання плавного виходу постійного струму і радіатор для управління тепловим режимом.

## **2.10 Підвищувальний перетворювач постійного струму**

Перетворювач постійного струму, що розглядається в цьому дослідженні, є підвищувальним перетворювачем, який використовується для підвищення напруги мікромережі постійного струму МВТ для живлення побутових приладів у разі відключення електроенергії. Очікується, що підвищувальний перетворювач забезпечить 240 В постійного струму для навантаження потужністю 3 кВт. Підвищуючи напругу до 240 В постійного струму, вихідний струм буде зменшений, що зменшить теплові втрати через струм.

Загальна схема підвищувального перетворювача складається з діода, перемикача та накопичувача енергії. Як правило, в якості перемикаючого елемента використовується IGBT, в той час як котушка індуктивності слугує накопичувачем енергії.

Коли підвищувальний перетворювач керується контролером МРРТ, він підвищує напругу і контролює її, щоб досягти МРР. МРРТ виробляє точний коефіцієнт навантаження, який використовується для керування підвищувальним перетворювачем у відповідному напрямку, щоб досягти МРР якомога швидше і точніше.

## 2.11 Аналіз прийнятого методу керування МРРТ

Прийнятий МРРТ базується на безпосередній зміні коефіцієнту корисної дії підвищувального перетворювача постійного струму на постійний струм. У методі Р&О з фіксованим розміром кроку для зменшення коливань навколо робочої точки коефіцієнт завантаження перетворювача може бути змінений шляхом вставки розміру кроку  $\Delta D$  на кожному відліку в залежності від умов експлуатації. МРРТ можна отримати, якщо виконується наступне рівняння:

$$\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} = 0 \quad (2.5)$$

де  $P_{dc}$  і  $V_{dc}$  - потужність і напруга ланки постійного струму відповідно.

Крива залежності  $P_{dc}$  від  $V_{dc}$  має лише одну робочу точку, в якій може бути досягнута максимальна потужність. Тому відстеження точки максимальної потужності може бути виконано шляхом покрокового пошуку, а не з урахуванням таких параметрів, як швидкість вітру.

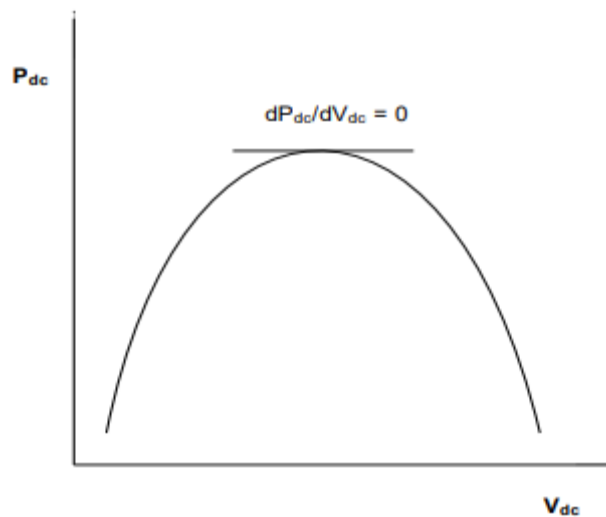


Рисунок 2.10 - Потужність ланки постійного струму проти напруги ланки постійного струму

Модифікація коефіцієнта завантаження слідує за напрямком нахилу  $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}}$ ; він зростає в зоні високих значень характеристики генератора (рис. 2.9). Таким

чином, частота обертання ротора генератора зменшується, а потужність зростає до тих пір, поки регулятор не досягне точки MPP. Аналогічно, коли початкова точка знаходиться в зоні низьких швидкостей, слідуючи за напрямком нахилу  $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}}$ , що призводить до зменшення коефіцієнта завантаження. Таким чином, частота обертання ротора генератора збільшується повільно, а регулююча змінна прагне до MPP

## 2.12 Мікромережа постійного струму на основі МВТ з керуванням R&O MPPT

Схема мікромережі постійного струму на основі МВТ з керуванням R&O MPPT показана на рис.2.10.

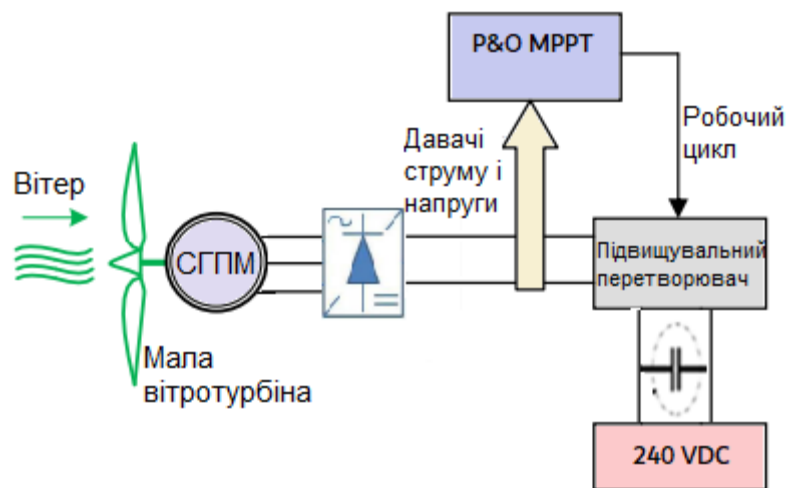


Рисунок 2.11 - Мікромережа постійного струму на основі МВТ з використанням R&O керуванням

Метод R&O - це кваліфікований метод оптимізації, заснований на пошуку точки локального оптимуму заданої функції. Він використовується для пошуку ідеальної робочої точки. Таким чином, він допомагає максимізувати видобуток енергії. Цей метод ґрунтується на введенні невеликого кроку зміни розміру керуючої змінної і спостереженні за зміною цільової функції до тих пір, поки нахил функції не стане рівним нулю. Як показано на рис. 2.11, регулятор



спрямовує робочу точку, знаходячи положення і відстань між робочою точкою і піковою точкою. Робоча точка рухається вправо, якщо вона знаходиться в крайній лівій зоні, і навпаки. У цьому методі коефіцієнт корисної дії підвищувального перетворювача збурюється, і спостерігається потужність ланки постійного струму. Метод не вимагає вимірювання швидкості вітру, отже, механічні датчики не потрібні.

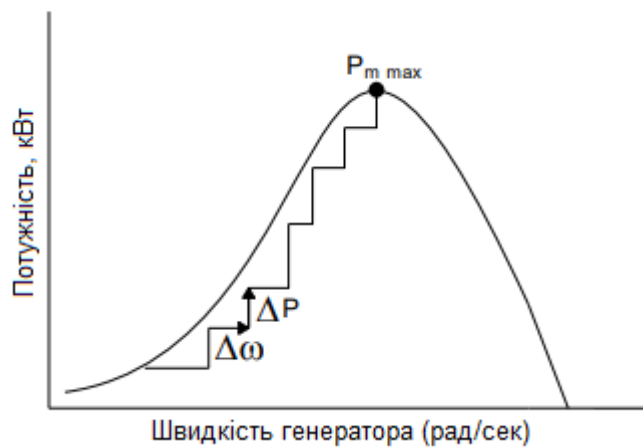


Рисунок 2.12 - Залежність потужності від швидкості

Було запропоновано скоригований алгоритм P&O MPPT для реалізації швидкого відстеження МРП при швидкій зміні швидкості вітру. Рекомендована методика MPPT не потребує інформації про параметри вітрової турбіни або механічних датчиків. Алгоритм використовується у двох режимах роботи для подолання вищезгаданих обмежень традиційного методу P&O. Перехід від одного режиму роботи до іншого здійснюється на основі зміни швидкості вітру. Звичайний метод P&O з малим кроком не може відслідковувати МРП при повільній зміні швидкості вітру. У той же час, якщо спостерігається швидка зміна швидкості вітру, перемикається режим прогнозування, який швидко зміщує робочу точку навколо МЕС. Для виявлення швидкої зміни швидкості вітру використовується зміна напруги ланки постійного струму.

Алгоритм P&O працює наступним чином:

На першому кроці потужність визначається за допомогою напруги та струму, а потім порівнюється з минулим значенням потужності. Якщо різниця дорівнює нулю, напруга буде підтримуватися на тому ж рівні, і алгоритм намагатиметься коливатися навколо тієї ж самої МРС. У разі зміни потужності алгоритм продовжить роботу і перевірить різницю між обома рівнями напруги. Якщо різниця потужностей позитивна, алгоритм змінить напругу в аналогічному напрямку, збільшуючи або зменшуючи її, як і в попередньому випадку. Таким чином, якщо різниця напруг позитивна, алгоритм буде продовжувати збільшувати напругу і навпаки. Однак, якщо різниця потужностей від'ємна, алгоритм буде вести напругу в протилежному напрямку. Отже, зміна напруги буде від'ємною, і алгоритм буде збільшувати напругу. Нарешті, якщо зміна напруги буде позитивною, алгоритм зменшить напругу. Алгоритм може вільно керувати робочою напругою, змінюючи коефіцієнт завантаження. Будь-яка зміна коефіцієнта завантаження призведе до зворотного впливу на вхідний опір DC-DC перетворювача і змінить робочу напругу для виконання чотирьох випадків.

### **2.13 Реалізація МРРТ для підвищувального перетворювача постійного струму**

Вихідна напруга підвищувального перетворювача постійного струму залежить від коефіцієнта завантаження. На рис. 2.13 показано схему підвищувального перетворювача, керованого за допомогою МРРТ-контролера. Вхід контролера підключений до вимірювань напруги та струму від МВТ після каскаду випрямлення. Потім за цими двома параметрами оцінюється потужність і порівнюється з попереднім значенням. Знак потужності визначає коефіцієнт завантаження на виході контролера МРР. Коефіцієнт корисної дії підвищувального перетворювача являє собою керуючу змінну. Збурення коефіцієнта завантаження призведе до збурення струму СРП, а отже, до збурення напруги СРП. Діапазон коефіцієнта завантаження обмежений між

нулем і гарантує, що перетворювач буде підвищувати вхідну напругу в межах обмеження.

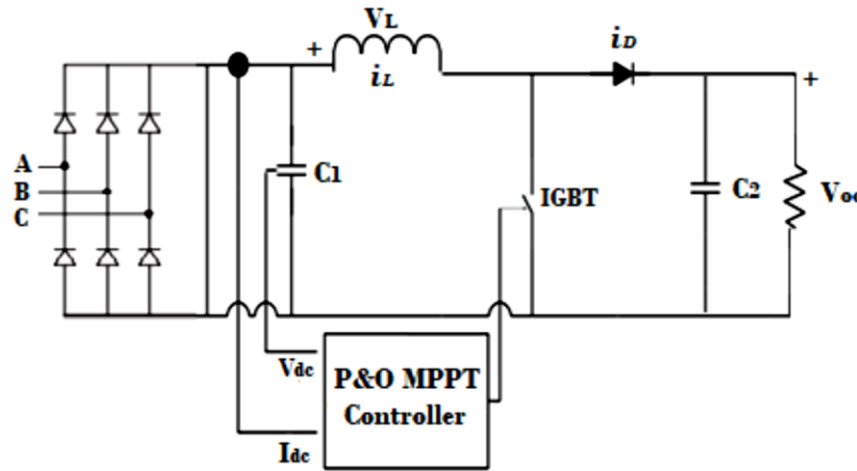


Рисунок 2.13 - Підвищувальний перетворювач з контролером P&O MPPT.

Коефіцієнт завантаження повинен бути обраний належним чином. Оскільки техніка P&O коливається навколо MPP, зменшення кроку коефіцієнта завантаження може мінімізувати коливання і втрати в усталеному режимі. Однак регулятор стає менш ефективним, коли атмосферні умови швидко змінюються. Наступне рівняння виражає коефіцієнт завантаження:

$$a = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) описує закон керування, що виробляється контролером MPPT для роботи ВЕУ на МРП в залежності від швидкості вітру. У випадку, якщо робоча напруга генератора збурюється в певному напрямку, і це збурення зміщує робочу точку в бік МРП. Алгоритм P&O буде продовжувати збурення напруги генератора в аналогічному напрямку. У випадку, якщо зміна робочої точки зміщується від МРП, алгоритм P&O змінює напрямок збурення на протилежний. Таким чином, система працює, збільшуючи або зменшуючи робочу напругу і спостерігаючи за її впливом на вихідну потужність. Збурення робочої напруги відбувається з кожним циклом MPPT. Після досягнення MPP

вона буде коливатися навколо ідеальної робочої напруги. Наприклад, якщо контролер відчуває, що вхідна потужність збільшується, а напруга зростає, він зменшить опорну напругу близько до MPP.

## **2.14 Висновки до розділу**

1. Мікромережа має бути спроектована таким чином, щоб включати різні типи відновлюваних джерел і систем накопичення енергії для роботи як в режимі підключення до мережі, так і в автономному режимі для забезпечення електропостачання навантажень.
2. Розглянуто питання проектування мікромережі постійного струму на основі малої вітротурбіни.
3. Проведено коротке дослідження автономної малої вітрової турбіни в мікромережах постійного струму, в тому числі вибір місця, технології, топології силових електронних перетворювачів та методи визначення точки максимальної потужності.

## 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Опис мікромережі

Нами розроблено модель автономної мікромережі постійного струму МВТ. Система призначена для роботи в якості допоміжного джерела живлення житлового будинку для забезпечення живлення таких приладів, як світлодіодне освітлення, комп'ютери, приводи з регульованою швидкістю тощо, щоб зменшити або унеможливити перебої в електропостачанні. Зазвичай такі ВЕУ - це ГВГУ, які кріпляться на коротких вежах заввишки кілька метрів або розміщуються на дахах будівель, вишках стільникового зв'язку тощо. У ВЕУ аеродинамічна секція безпосередньо з'єднана з ВЕУ без системи передач. Вітер змушує турбіну обертатися і виробляти електроенергію. Така система може покращити енергопостачання об'єктів, включаючи житлові будинки, ферми, школи, малі комерційні підприємства або навіть ізольовані громадські об'єкти. Вони практичні та економічні в місцях з високим вітровим потенціалом.

Автономна мікромережа постійного струму МВТ генерує 3 кВт при напрузі 120 В, і очікується, що вона видаватиме 3 кВт при напрузі 240 В постійного струму. Структурне представлення системи показано на рисунку 3.1, яка включає в себе МВТ на основі СГПМ, трифазний діодний мостовий випрямляч, конденсатор ланки постійного струму та підвищувальний перетворювач постійного струму, підключений до навантаження постійного струму. Роль конденсатора ланки постійного струму полягає в підтримці постійної напруги на шині постійного струму. Для вилучення максимальної потужності та контролю вихідної напруги перетворювача для керування комутаційним елементом використовується скоригований алгоритм R&O MPPT, який забезпечує швидке відстеження MPP та підтримує постійну напругу незалежно від зміни швидкості вітру.

Для перевірки ефективності розробленої системи було розроблено модель мікромережі постійного струму MBT в MATLAB Simulink, результати якої будуть представлені в наступному розділі.

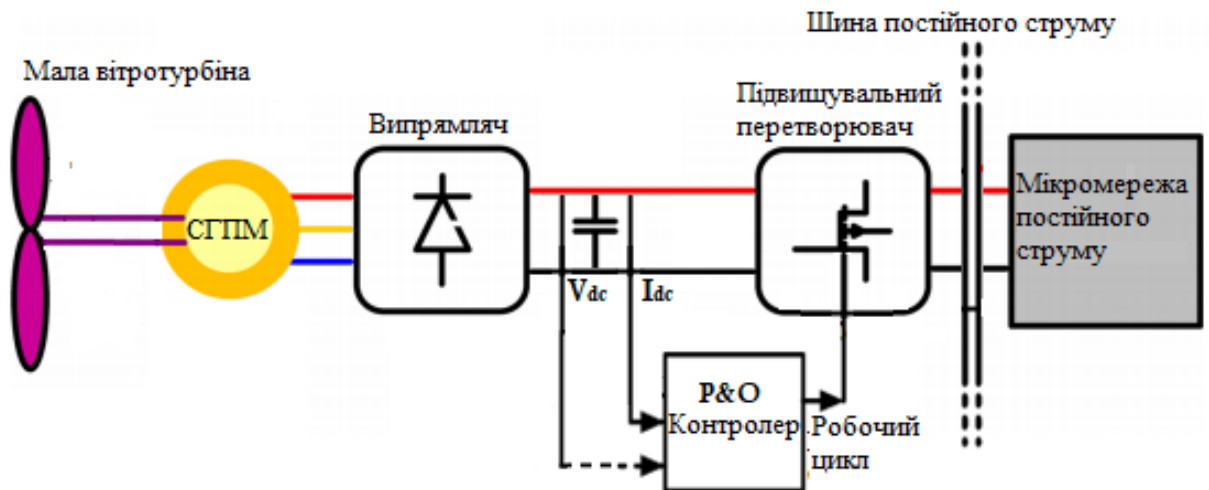


Рисунок 3.1 - Структура малої вітрової турбіни, підключеної до мікромережі постійного струму

### 3.2 Профіль навантаження

Мікромережа постійного струму MBT, що розглядається в цьому дослідженні, генерує 3 кВт при напрузі 240 В постійного струму. Очікується, що вона забезпечуватиме електроенергією домогосподарство, включаючи такі навантаження, як світлодіодне освітлення, комп'ютер, зарядний пристрій для мобільного телефону, телевізор, принтер, кавоварку, вентилятор, радіо, холодильник та фен у разі відключення електроенергії від основної електромережі. Потреба в електроенергії для кожного приладу, кількість приладів та час їхньої роботи наведені в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Прилади постійного струму, що використовуються в одному будинку.

Тип обладнання постійного струму	Потужність, Вт	Кількість	Час роботи в день, год
Світлодіодне світло	30	6	8
Портативний комп'ютер	65	2	5
Зарядний пристрій для мобільного телефону	19	2	6
Телебачення	133	1	6
Принтер Лазерний	15	1	2
Кавоварка	22	1	1
Вентилятор	72	1	4
Радіо	70	1	5
Холодильник постійного струму	2040	1	24
Фен для волосся	300	1	1

### 3.3 Розробка моделі

#### 3.3.1 Аеродинамічне моделювання вітрової турбіни

Зв'язок між швидкістю та вихідною потужністю вітрової турбіни описується наступним рівнянням [20]:

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

де  $\rho$  - густина повітря при тиску 1 атм, що дорівнює 1,225 кг/м<sup>3</sup>,

$A$  - площа вітродвигуна в м<sup>2</sup>,

$V$  - швидкість вітру (м/с),

$C_p$  - коефіцієнт потужності, що залежить від  $\lambda$ , наведеного в рівнянні, і  $\beta$ .

Коефіцієнт потужності можна змоделювати як [21]:

$$C_p \lambda, \beta = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3.1)$$

де  $C_4 = 0,5176$ ,

$C_2 = 116$ ,

$C_3 = 0,4$ ,

$C_4 = 5$ ,

$C_5 = 21$ ,

$C_6 = 0,0068$ .

Взаємозв'язок між співвідношенням швидкості наконечника і кутом нахилу наведено нижче [21]:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,089\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3.2)$$

Механічний крутний момент  $\tau_w$  вітрової турбіни можна змоделювати за допомогою наступного рівняння [22]:

$$\tau_w = \frac{P_m}{\omega} \quad (3.3)$$

де  $\omega$  - частота обертання ротора вітрової турбіни.

На рис. 3.2 показано Simulink-модель аеродинаміки вітрової турбіни, розроблену на основі рівнянь (2.2), (2.4), (3.1), (3.2) і (3.3).

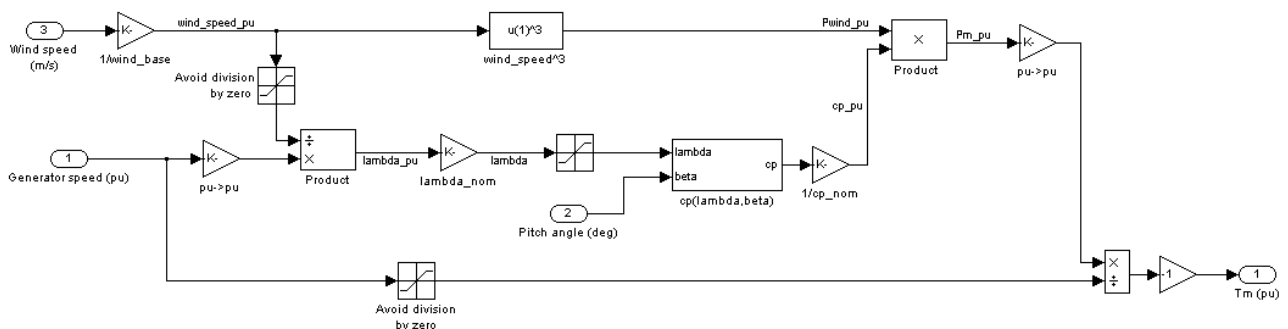


Рисунок 3.2 - Simulink-модель аеродинаміки вітрової турбіни



Як правило, для вітрогенераторів з кутом нахилу, що дорівнює нулю, максимальне значення коефіцієнта потужності становить 0,48. На рис. 3.3 показано криву енергетичних характеристик розглянутої ВЕУ, виражену на одиницю для різних швидкостей вітру, коли кут тангажу дорівнює нулю. Коефіцієнт потужності є максимальним для оптимального співвідношення швидкості наконечника до швидкості вітру, коли кут нахилу лопатей дорівнює нулю. З рисунка 3.3 видно, що для кожної швидкості вітру існує певна точка на енергетичній характеристиці МВТ, де потужність максимальна.

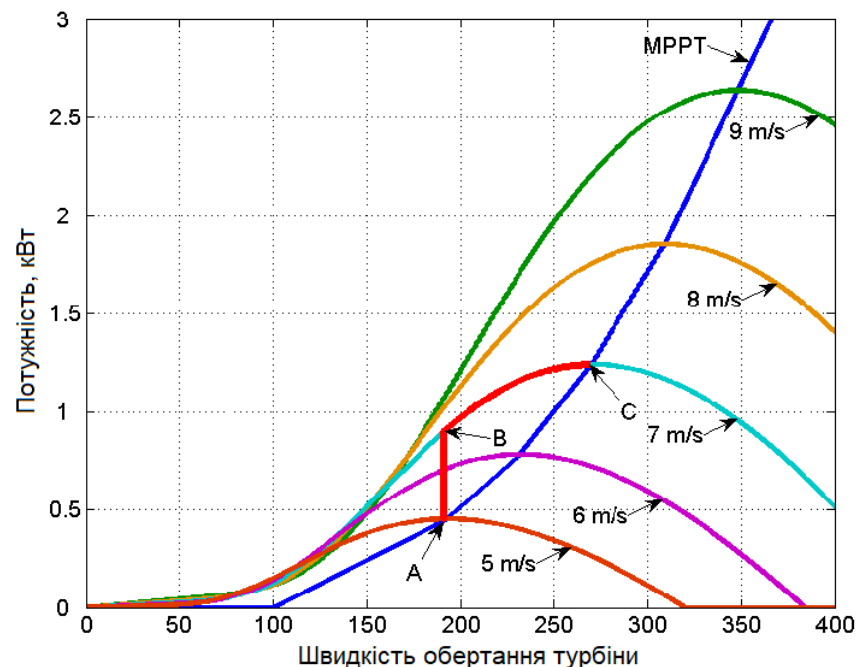


Рисунок 3.3 - Характеристика потужності турбіни з MPPT

Значення співвідношення швидкостей обертання наконечника є постійним для всіх точок максимальної потужності. Зв'язок між оптимальним співвідношенням частоти обертання наконечника та швидкістю обертання турбіни  $\Omega_n$  має вигляд :

$$\Omega_n = \lambda_{opt} \frac{V_n}{R} \quad (3.5)$$

де  $V_n$  - швидкість вітру.

### 3.3.2 Моделювання СГПМ

Динаміку СГПМ можна представити за допомогою математичних моделей напруг, струмів і частоти обертання ротора генератора. Ці моделі є параметричними і можуть бути використані незалежно від розміру генератора. Для розробки цих моделей необхідно визначити схему, яка описує поведінку генератора, враховуючи такі змінні, як внутрішня напруга, опір і реактивний опір. Після цього моделі можуть бути перетворені в еквівалентні схеми у двовісних системах координат. У цьому розділі статор і ротор ГМПГ моделюються по осі  $dq0$ .

### 3.3.3 Динамічна модель ПМСГ

На рис. 3.4 показано фазову діаграму перетворення  $abc$  в  $dq0$ , в якій вісь  $d$  суміщена з північним полюсом ротора, а вісь  $q$  на  $90^\circ$  випереджає вісь  $d$  у напрямку обертання.

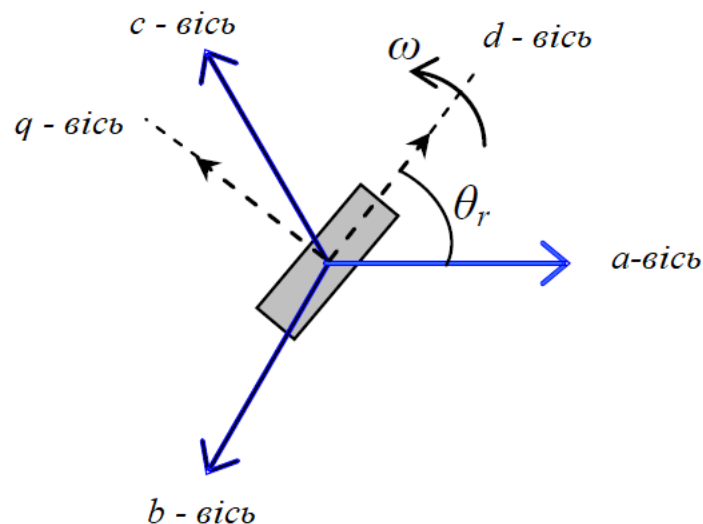


Рисунок 3.4 - Вісь  $abc$ - $dq$

Напруга СГПМ в системі відліку  $dq0$  задається рівняннями У цих рівняннях нижче (3.6) і (3.7) використано формули [23]:

$$v_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q, \quad (3.6)$$

$$v_q = R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega_e i_d + \psi \omega_e. \quad (3.7)$$

Тоді як потік виражається як:

$$\psi_q = L_q i_q, \quad (3.8)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_{PM}, \quad (3.9)$$

де  $L_d$  і  $L_q$  - індуктивності ротора по осях d і q,

$R_d$  і  $R_q$  - опори ротора по осях d і q,

$i_d$  і  $i_q$  - струми генератора по осях d і q,

$\psi_{PM}$  - потік постійного магніту і

$\omega_e$  - електрична кутова швидкість ПМСГ, яка визначається як:

$$\omega_e = p_n \omega_m \quad (3.10)$$

де  $p_n$  - кількість пар полюсів генератора

Електромагнітний момент ПМСГ може бути виражений як:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \left[ L_{sd} - L_{sq} i_{sd} i_{sq} + \psi_{PM} i_{sq} \right]. \quad (3.11)$$

У випадку, коли розглядається поверхневий монтаж ПМСГ, а вісь струму статора q припускається як вісь круглого ротора ( $L_d = L_q$ ), рівняння (3.11) може бути записано як:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_{PM} i_{sq}. \quad (3.12)$$

Рівняння руху ПМСГ може бути виражене як:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} T_e - T_m - F\omega_m \quad (3.13)$$

Активна та реактивна потужності ПМСГ можуть бути виражені рівняннями (3.14) та (3.15) відповідно:

$$P_{gen} = \frac{3}{2} [v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}] \quad (3.14)$$

$$Q_{gen} = \frac{3}{2} [v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}] \quad (3.15)$$

### 3.4 Моделювання силової електроніки

Загалом, роль електронних силових пристроїв полягає в ефективному управлінні та контролі потоку електроенергії шляхом забезпечення напруг та струмів за допомогою напівпровідникових пристроїв, які найкраще відповідають вимогам навантаження. Система керування для силової електроніки зазвичай складається з лінійних комбінованих схем та/або цифрових сигнальних процесорів. Вихід перетворення потужності зазвичай порівнює блок контролера зі зворотним зв'язком з необхідним або еталонним значенням, а контролер зменшує похибку між ними. Потік потужності в силовому електронному блоці може включати оборотну зміну стану при використанні достатньої кількості напівпровідникових пристроїв, таким чином змінюючи ролі між входами і виходами. Цей розділ охоплює моделювання випрямляча, а також моделювання підвищувального перетворювача.

#### 3.4.1 Моделювання перетворювача змінного струму в постійний

Некеровані трифазні випрямлячі - це трифазні перетворювачі, які використовують діоди для живлення кола постійного струму від джерела змінного струму. Вони складаються з двох діодів у кожному плечі, із загальною

кількістю трьох плечей. На рис.3.7 показана схема трифазного повнохвильового діодного мостового випрямляча.

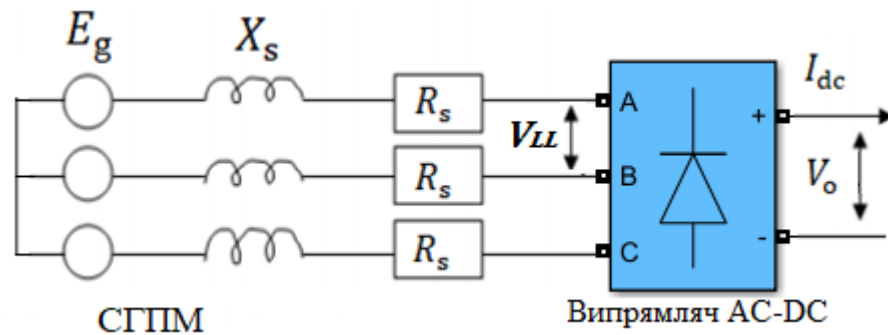


Рис. 3.5 - Трифазний повномостовий діодний випрямляч з СГПМ

Середня вихідна напруга випрямляча визначається наступними рівняннями [24]:

$$V_o = \frac{1}{3} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{6} V_{LL} \cos \omega t \, d \omega t \quad (3.16)$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \quad (3.17)$$

де  $V_{LL}$  - міжфазна номінальна напруга.

### 3.4.2 Підвищувальний перетворювач постійного струму в постійний

Метою проектування підвищувального перетворювача постійного струму (рис. 3.6) є забезпечення регульованої вихідної напруги постійного струму для постійного навантаження автономної мікромережі постійного струму МВТ від змінної вхідної напруги постійного струму. Підвищувальний перетворювач постійного струму може підвищувати напругу, зменшуючи при цьому струм і зберігаючи ту ж потужність на виході.

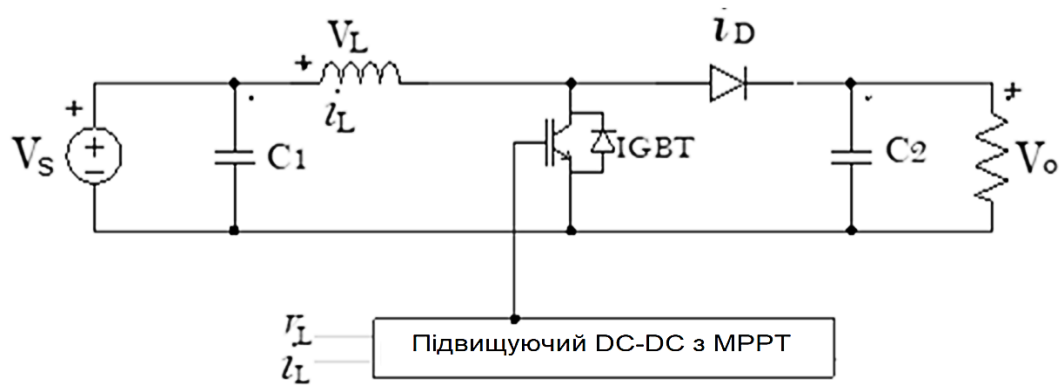


Рисунок 3.6 - Підвищувальний перетворювач постійного струму

### 3.4.2.1 Конструктивні особливості

Більшість підвищувальних перетворювачів призначені для роботи на постійному струмі. Індуктивність для отримання безперервного струму визначається рівнянням (3.26), а рівняння виражають пульсації вихідної напруги. (3.28) і (3.31).

Високі частоти перемикавання бажані для зменшення розмірів як котушки індуктивності, так і конденсатора, оскільки мінімальний розмір котушки індуктивності для отримання безперервного струму і мінімальний розмір конденсатора для обмеження пульсацій на виході зменшуються зі збільшенням частоти перемикавання. Однак високі частоти перемикавання можуть збільшити втрати потужності в перемикачах, знижуючи ефективність перетворювача. Типові частоти перемикавання перевищують 20 кГц, щоб уникнути аудіошуму, і піднімаються до діапазону МГц. Деякі розробники вважають, що частота перемикавання близько 500 кГц є найкращим компромісом між малим розміром компонента та ефективністю. На відміну від них, інші вважають за краще використовувати частоти перемикавання близько 50 кГц, щоб зменшити втрати на перемикавання, а деякі все ще використовують частоти вище 1 МГц.

### 3.4.2.2 Залежність між напругою і струмом

Припущення, зроблені в цьому розділі, включають наступне:

1. Існують стаціонарні умови.
2. Період перемикання дорівнює  $T$ , і вимикач замкнений протягом часу  $DT$  і розімкнений протягом  $(1 - D)T$ .
3. Струм котушки індуктивності неперервний (завжди додатний).
4. Конденсатор дуже великий, і вихідна напруга підтримується постійною при напрузі  $V_o$ .
5. Компоненти ідеальні.

Взаємозв'язок між напругою і струмом підвищувального перетворювача на рис. 3.7 досліджується шляхом вивчення напруги і струму індуктивності, коли перемикач замкнутий і коли він розімкнутий.

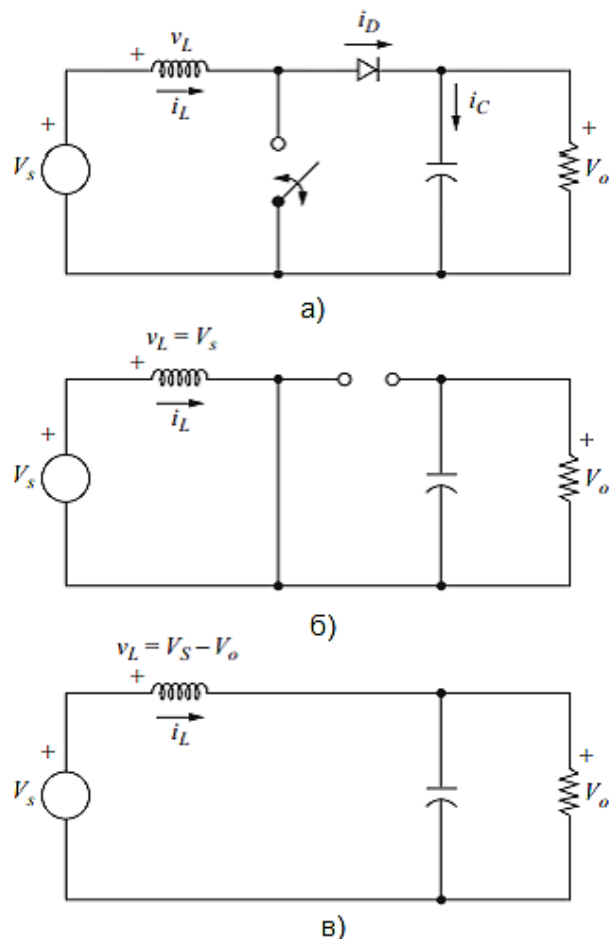


Рис. 3.7 - Підсилювальний перетворювач. (а) Схема; (б) Еквівалентна схема при замкненому вимикачі; (в) Еквівалентна схема при розімкненому вимикачі

Коли перемикач закритий (рис. 3.7,с), діод має зворотне зміщення, і закон напруги Кірхгофа можна записати так:

$$V_s = L \frac{di_L}{dt} . \quad (3.18)$$

Швидкість зміни струму постійна; отже, струм буде зростати лінійно, як показано на рисунку 3.8в. Зміна струму в котушці індуктивності виражається рівняннями (3.19) і (3.20) як

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} , \quad (3.19)$$

$$\Delta i_{L \text{ closed}} = \frac{V_s DT}{L} . \quad (3.20)$$

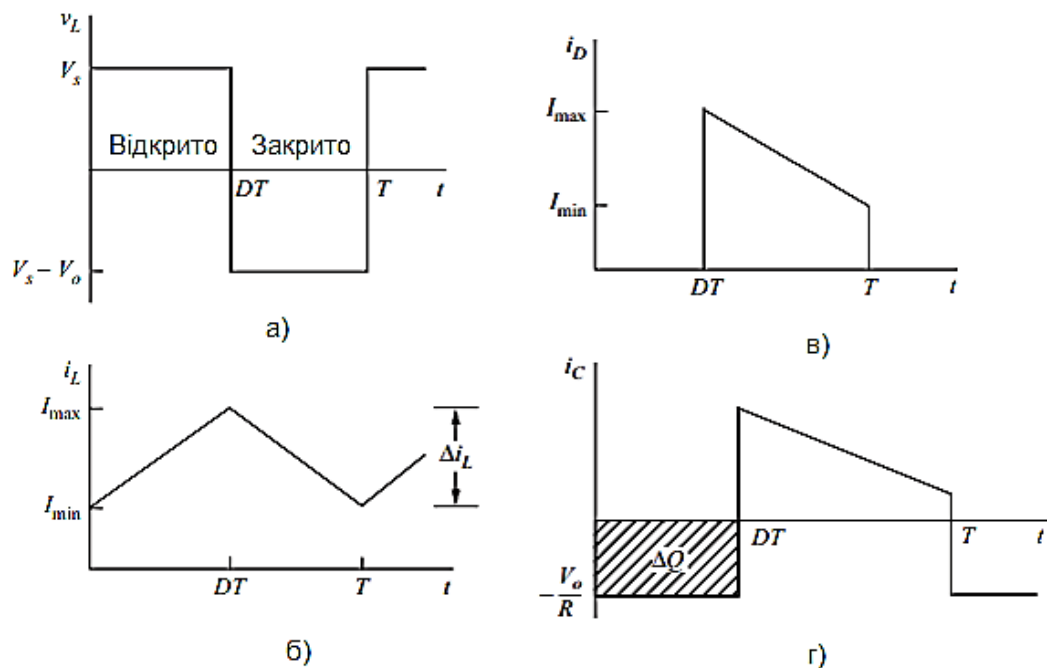


Рисунок 3.8 - (а) Напруга і (б) струм котушки індуктивності; (в) струм діода і (г) струм конденсатора

Коли вимикач розімкнено, струм індуктивності не може змінюватися миттєво. Отже, діод зміщений вперед, а напруга на котушці індуктивності та зміна струму котушки індуктивності мають вигляд



$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}, \quad (3.21)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}. \quad (3.22)$$

Швидкість зміни струму котушки індуктивності є постійною величиною, отже, струм змінюється лінійно, коли вимикач розімкнутий. Зміна струму індуктора виражається в рівняннях (3.23) і (3.24) наступним чином:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{1-D T} = \frac{V_s - V_o}{L}, \quad (3.23)$$

$$\Delta i_{L \text{ open}} = \frac{V_s - V_o}{L} (1-D T). \quad (3.24)$$

Для усталеного режиму роботи чиста зміна струму індуктивності дорівнює нулю, а вихідна напруга перетворювача має вигляд

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (3.25)$$

Коли коефіцієнт завантаження ключа наближається до 1, вихідна напруга перетворювача прямує до нескінченності. Однак реальні компоненти завжди мають втрати, які перешкоджають цьому. На рисунку 3.8 показано напругу і струм індуктивності, а також напругу і струм діодів і конденсаторів для підвищувального перетворювача. Середній струм в котушці індуктивності оцінюється, виходячи з того, що середня потужність джерела дорівнює середній потужності, що поглинається навантаженням. Таким чином, вихідна потужність може бути визначена як:

$$P_o = \frac{v_o^2}{R} = V_o I_o. \quad (3.26)$$

Середній струм котушки індуктивності можна виразити як:

$$I_L = \frac{V_s}{1-D} \frac{V_o}{R} = \frac{V_o^2}{V_s R} = \frac{V_o I_o}{V_s} \quad (3.27)$$

Максимальний струм котушки індуктивності  $I_{\max}$  і мінімальний струм котушки індуктивності  $I_{\min}$  виражаються наступним чином:

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{1-D} \frac{V_o}{R} + \frac{V_s D T}{2L} \quad (3.28)$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{1-D} \frac{V_o}{R} - \frac{V_s D T}{2L} \quad (3.29)$$

Підвищувальний перетворювач, призначений для роботи на постійному струмі, повинен мати значення індуктивності більше, ніж  $L_{\min}$ . Мінімальна індуктивність для безперервного струму в підвищувальному перетворювачі визначається як:

$$L_{\min} = \frac{D}{2f} \frac{1-D}{R} \quad (3.30)$$

Індуктивність  $L$  можна виразити через бажану зміну струму індуктора  $\Delta i_L$  як:

$$L = \frac{V_s D T}{\Delta i_L} = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (3.31)$$

### 3.4.3 Пульсації напруги

Попередні рівняння припускали, що вихідна напруга постійна, що передбачає нескінченну ємність. На практиці, скінченна ємність спричиняє коливання вихідної напруги або пульсації. Пульсації напруги від піку до піку можна оцінити за струмом конденсатора, як показано на рис. 3.8г.

Зміна напруги на конденсаторі може бути визначена як:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (3.32)$$

де  $f$  - частота перемикачання.

Таким чином, ємність може бути виражена в термінах пульсацій напруги як [24]:

$$C = \frac{D}{R \Delta V_o / V_o f} \quad (3.33)$$

Еквівалентний послідовний опір (ESR) конденсатора може суттєво впливати на пульсації напруги. Зміна струму конденсатора від піку до піку на рисунку 3.10d подібна до максимального струму котушки індуктивності.

Пульсація напруги через ESR визначається як [24]:

$$\Delta V_{o,ESR} = \Delta i_C r_C = I_{L,max} r_C \quad (3.34)$$

### **3.5 Керування підвищувальним перетворювачем для отримання максимальної потужності**

Для отримання оптимальної потужності при коливаннях швидкості вітру швидкість генератора повинна регулюватися за допомогою перемикача перетворювача. Керування перетворювачем в даному випадку здійснюється за допомогою алгоритму MPPT, заснованого на методі P&O через його простоту і легкість структури реалізації. Коефіцієнт завантаження автоматично змінюється для створення напруги, необхідної для отримання максимальної потужності.

Вихідна потужність МВТ  $P_w$  може бути записана наступним чином:

$$P_w = V_w I_w \quad (3.35)$$

де  $V_w$  і  $I_w$  - це напруга і струм МВТ відповідно.

Зв'язок між напругою МВТ  $V_w$  і напругою ланки постійного струму  $V_{dc}$  описується наступним рівнянням [3]:

$$V_w = \left( \frac{1}{1-D} \right) V_{dc} \quad (3.36)$$

### 3.6 Алгоритм керування методом Р&О (збурення та спостереження)

Напруга і струм МВТ вимірюються, як показано на рис. 3.9, і використовуються як вхідні дані для контролера МРРТ. Потім ці значення обробляються на основі алгоритму Р&О для відстеження максимальної потужності. Сигнал від контролера Р&О МРРТ використовується як вхід для підвищувального перетворювача, щоб підтримувати робочу напругу на МГЕС, змінюючи коефіцієнт корисної дії перетворювача. Невелике збурення вноситься в систему, щоб викликати зміну потужності МВТ. Якщо потужність збільшується через збурення, то збурення буде продовжуватися в тому ж напрямку. Як тільки досягається максимальна потужність, потужність в наступний момент зменшується, і збурення змінюється на протилежне. У стаціонарному стані алгоритм коливатиметься навколо МРРТ. Для того, щоб варіація потужності була невеликою, розмір збурення підтримується невеликим.

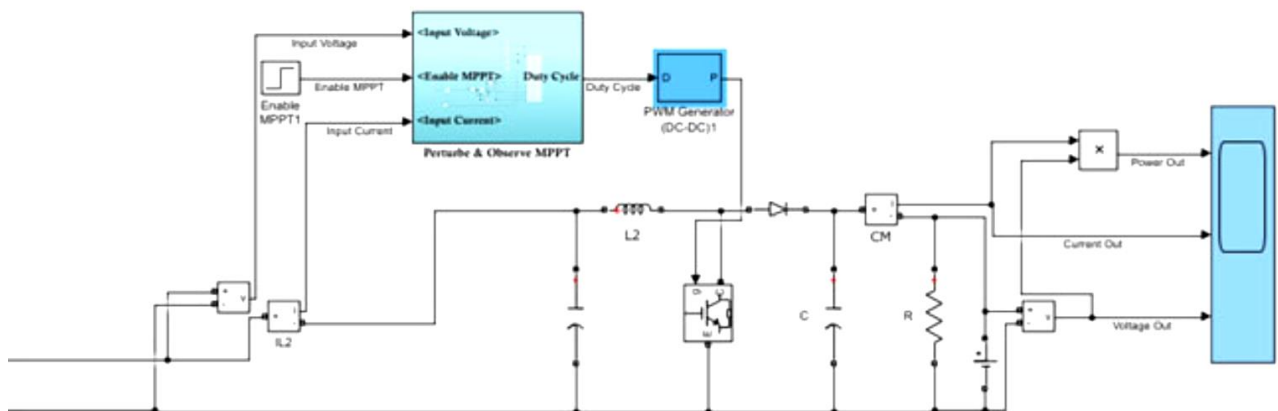


Рисунок 3.9 - Метод Р&О (збурення та спостереження) для регулювання напруги у мікромережі постійного струму

На рис. 3.10 показано блок-схему розробленого алгоритму; робоча напруга МВТ збурується невеликим збільшенням  $dV$ , що призводить до зміни  $dP$ . Якщо  $dP$  позитивний, збурення робочої напруги зберігається в тому ж напрямку, що і мале збільшення. Навпаки, якщо  $dP$  від'ємний, робоча точка зміщується від МРС, і робоча напруга повинна зміщуватися в напрямку, протилежному малому збільшенню.

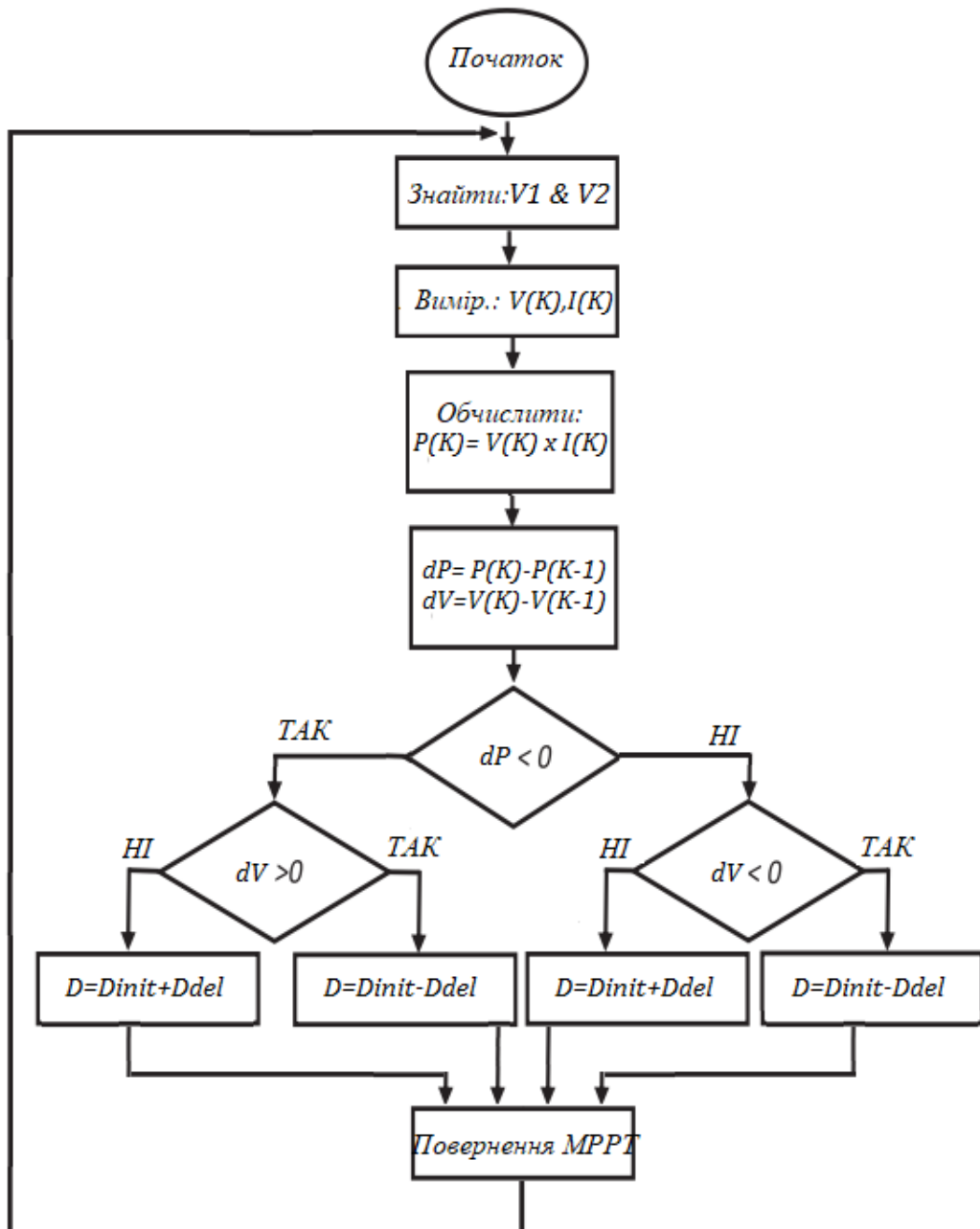


Рисунок 3.10 - Блок-схема алгоритму Р&О МРРТ для ВЕУ з підвищувальним перетворювачем

Хоча швидкість вітру сильно змінюється з часом, зміна потужності, що поглинається вітрогенератором, відбувається відносно повільно через повільну динамічну реакцію вітротурбіни. Регулювання коефіцієнту корисної дії перетворювача можна оцінити як:

$$D = D_{init} + C_1 \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{init}} \quad (3.37)$$

де  $D$  і  $D_{init}$  - коефіцієнти завантаження на ітераціях  $D$  і  $D_{init}$  відповідно,

$\frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{init}}$  - градієнт потужності ВЕУ на кроці на кроці  $D_{init}$ ,

$C_1$  - зміна кроку.

При зміні швидкості вітру, щоб забезпечити збіжність результатів до МПП МВТ, функція повинна мати єдину точку екстремуму, як показано на рисунку 3.3. З рисунку 3.3 видно, що МПП досягається, коли

$$\frac{dp}{d\Omega} = 0 \quad (3.38)$$

де  $\Omega$  - частота обертання ротора вітроколеса.

Рівняння (3.38) можна записати у вигляді

$$\frac{dp}{d\Omega} = \frac{dp}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_{МВТ}} \cdot \frac{dV_{МВТ}}{d\Omega_e} \cdot \frac{d\Omega_e}{d\Omega} = 0 \quad (3.39)$$

де  $V_{МВТ}$  - вихідна напруга випрямляча,

$\Omega_e$  - фазна кутова швидкість генератора.

Процес максимізації потужності показаний на рис. 3.13; оскільки регулювання коефіцієнта завантаження  $dP$  слідує за напрямком  $\frac{dp}{dD}$ , його значення збільшується у високошвидкісній зоні характеристики МВТ, що призводить до зменшення частоти обертання ротора і збільшення потужності - досягається МРР. Аналогічно, якщо початкова точка знаходиться у

низькошвидкісній зоні, слідуючи за  $dP$  у напрямку  $\frac{dp}{dD}$ , коефіцієнт завантаження зменшується і згодом сходиться до MPP, оскільки частота обертання ротора МВТ поступово збільшується .

$$V_{MBT} = 1 - D V_o \frac{dV_{MBT}}{dD} = V_o \neq 0 \quad (3.40)$$

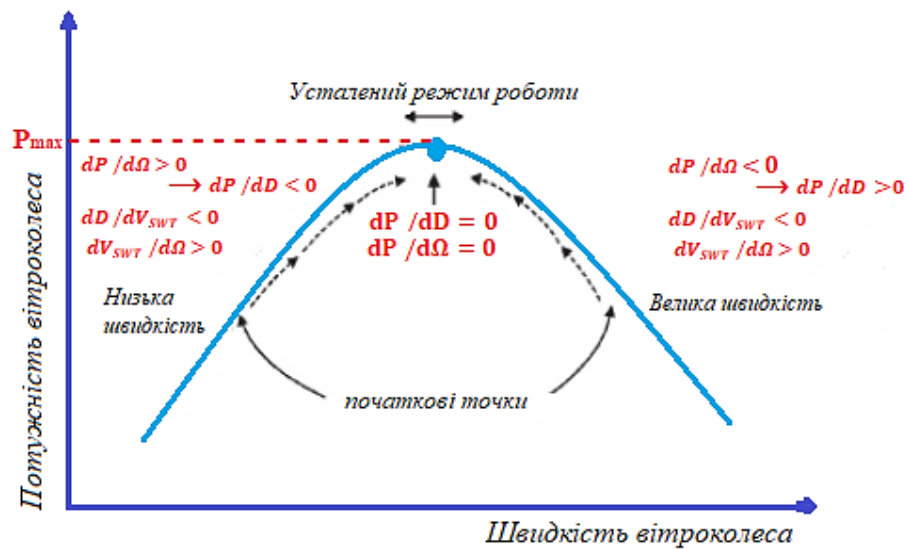


Рисунок 3.11 - Схема процесу МРРТ

Як показано на рис. 3.11, алгоритм розглядає вимірювання напруги  $V[k]$  та вимірювання струму  $I[k]$  через заздалегідь визначений проміжок часу, який називається періодом МРРТ - цей проміжок часу визначає, як часто алгоритм приймає рішення про зміну робочої точки системи - згодом алгоритм оцінює потужність  $P[k]$ , зміну потужності  $\Delta P$  та напруги  $\Delta v$ . Значення  $\Delta P$  та  $\Delta v$  визначаються за допомогою вимірювань у поточний момент  $V[k]$  та  $I[k]$ , а також попередніх вимірювань  $V[k-1]$  та  $I[k-1]$ . Потім алгоритм використовує базову логіку, щоб вирішити, що робити. Значення  $\Delta P$  і  $\Delta v$  порівнюються з нулем, щоб визначити, чи зросли вони, чи впали. Таблиця 3.2 показує короткий опис алгоритму Р&О. Таким чином, крива МВТ перевіряється невеликими збуреннями, щоб знайти МНК, яка збільшує час відгуку алгоритму. І навпаки, якщо розмір збурення збільшується, це генерує стаціонарні коливання навколо МНК.

Багато дослідників запропонували модифікації алгоритму Р&О для подолання проблеми часу відгуку та стаціонарних коливань [3]. Згідно з алгоритмом, вихідне результуюче збурення використовується для керування або коефіцієнтом завантаження, або опорною напругою. Підсумовуючи, якщо потужність зростає після певного збурення, наступне збурення має залишатися незмінним; однак, якщо потужність падає, результуюче збурення має бути в протилежному напрямку [23].

Таблиця 3.2 - Алгоритм Р&О

Збурення	$\Delta P$	Результат
+Ve	-Ve	+Ve
+Ve	+Ve	-Ve
-Ve	-Ve	+Ve
-Ve	+Ve	-Ve

Будь-яка зміна коефіцієнта завантаження матиме зворотний вплив на вхідний опір перетворювача і, отже, матиме зворотний вплив на робочу напругу. Потім алгоритм спостерігає за впливом цієї зміни робочого циклу на вихідну потужність, щоб визначити відповідну команду наступного циклу. Вихідна потужність може збільшуватися або зменшуватися залежно від того, чи знаходиться поточний рівень робочої напруги до або після точки коліна графіка потужності, як показано на рис. 3.11. Якщо робочий рівень знаходиться за межами точки коліна або МРР, то збільшення напруги призведе до зменшення вихідної потужності, і навпаки. Наприклад, зменшення робочого циклу викликає збільшення вхідного опору або робочої напруги і збільшує вихідну потужність. Це означає, що поточний робочий рівень знаходиться перед МРР. При збільшенні напруги вихідна потужність збільшиться. Таким чином, у наступному робочому циклі алгоритм збільшить напругу, чого можна досягти, зменшивши робочий цикл.



### 3.7 Загальний опис блок-схеми вітроенергетичної системи

На рис. 3.12 показана схема мікроенергетичної системи постійного струму малої вітрової турбіни, що розглядається в цій роботі. Вона складається з ВЕУ на основі СГПМ, трифазного діодного випрямляча, контролера P&O MPPT, підвищувального перетворювача постійного струму та навантаження постійного струму. Параметри мікромережі постійного струму МВТ наведені в таблицях 3.3 і 3.4. Вважається, що система працює при змінних швидкостях вітру. Тому змінна напруга і струм, отримані від вітрогенератора, використовуються як вхідні дані для діодного випрямляча, який перетворює змінну вихідну змінну напругу МВТ в постійну напругу. Після випрямлення підвищувальний перетворювач підвищує напругу до більш високого регульованого рівня постійної напруги, придатного для навантаження. Напруга і струм з вхідних клем підвищувального перетворювача використовуються як вхідні дані для контролера P&O MPPT. Напруга і струм постійно використовуються для оцінки коефіцієнта завантаження, який потім подається на підвищувальний перетворювач. Відповідно до коефіцієнта завантаження, підвищувальний перетворювач контролює рівень напруги, щоб постійно відстежувати точку максимальної потужності. Нарешті, вихід підвищувального перетворювача підключається до резистивного навантаження, яке діє як навантаження на стороні споживача мікромережі постійного струму.

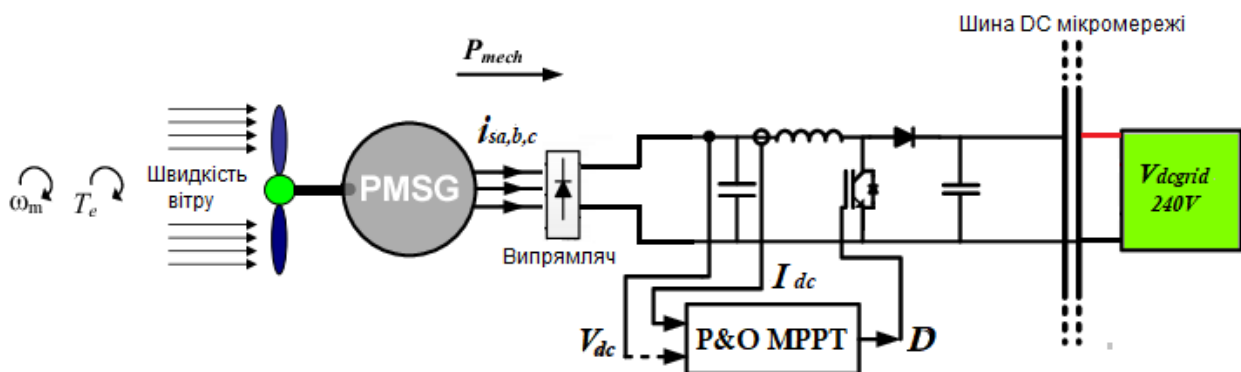


Рисунок 3.12 - Модель МВТ з СГПМ та DC-to-DC перетворювачем

Таблиця 3.3 - Параметри вітрової турбіни та СГПМ

Опис	Потужність
Номінальна потужність (P)	3 кВт
Вихідна напруга ( $V_{out}$ )	120 В
Щільність повітря ( $\rho$ )	1,225 кг/м <sup>3</sup>
Імпеданс ( $R_a$ )	0.9585 Ом
Індуктивність ( $L_q$ і $L_d$ )	5.25 мН
Радіус довжини лопаті	1.76 м
Потік намагнічування ( $\Phi_m$ )	0.16616 Вб
Коефіцієнт тертя (B)	0
Пара полюсів (Pp)	4
Крутний момент/струм (Т/А)	0.99696 Нм/А
Швидкість вітру на вході ( $V_d$ )	5 м/с
Номінальна швидкість вітру ( $V_n$ )	12 м/с
Момент інерції (J)	0,0006329 кг/м <sup>2</sup>
В'язке демпфування (F)	0,0003035 (Н.м.с)
Кут тангажу ( $\beta$ )	0 град.

Таблиця 3.4 - Характеристики параметрів буст-перетворювача

Опис	Номінальні характеристики
Потужність перетворювача	P= 3 кВт
Вхідна напруга	$V_{in} = 120$ В
Вихідна напруга	$V_{out} = 240$ В
Підсилювальний індуктор	$L = 1.263 \times 10^{-8}$ Н
Конденсатори ланки постійного струму	$C = 260.4$ мкФ
Опір навантаження	$R = 19.2$ Ом
Частота перемикання	$f_s = 10$ кГц
Піковий струм індуктивності	0.4 А
Пульсації вихідної ємності	0.01 %
Пульсація вихідної напруги	0.04 %
Час вибірки	$T_s = 50 \times 10^{-6}$ с
Пульсація ємності	0.01%

### **3.7.1 Модель малої вітрової турбіни**

Вітрова турбіна була змодельована за допомогою математичних рівнянь, представлених у попередніх підрозділах. Кількість енергії, яку невелика вітрова турбіна може отримати від вітру, залежить від конструкції турбіни. Такі фактори, як діаметр ротора і швидкість вітру, впливають на потужність, яку турбіна може отримати від вітру.

### **3.7.2 Модель електричної системи**

Електрична система складається з синхронного генератора з постійними магнітами, некерованого трифазного випрямляча і перетворювача постійного струму в постійний, як показано на рисунках 3.7 і 3.8. Значення параметрів моделювання підвищувального перетворювача постійного струму та конденсатора ланки постійного струму отримано за допомогою рівнянь перетворювача, наведених у попередніх підрозділах. Ці параметри базуються на номінальній потужності перетворювача, потужності МВТ та вимогах до пульсацій напруги перетворювача.

### **3.7.3 Імітаційна модель керування**

Керування підвищувальним перетворювачем здійснюється методом "збурення і спостереження" за коефіцієнтом корисної дії перетворювача і забезпечує постійну напругу 240 В постійного струму при номінальній потужності 3 кВт. Розроблена Matlab/Simulink модель відстеження максимальної потужності, показана на рис. 3.13, базується на алгоритмі, зображеному на рисунку 3.10.

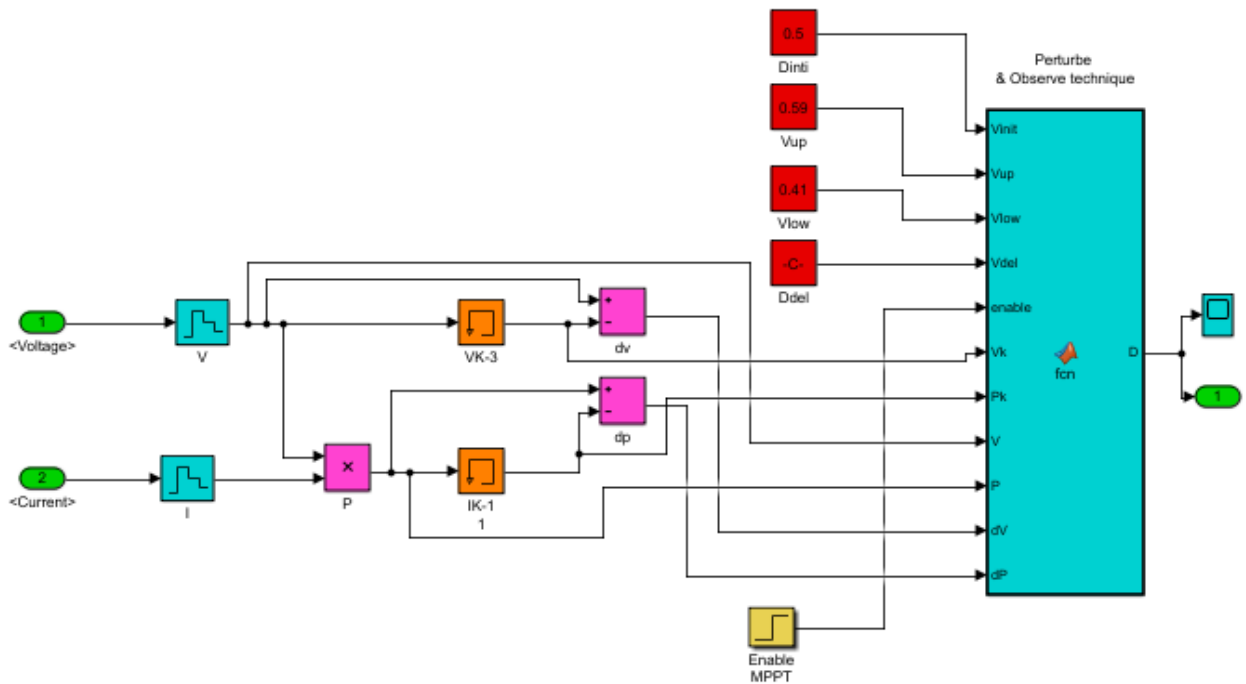


Рисунок 3.13 - Модель керування MPPT методом P&O представлена у Simulink

### 3.8 Результати моделювання

Модель на рис.3.12 була змодельована за допомогою середовища MATLAB/Simulink на основі параметрів, наведених у Таблицях 3.3 і 3.4, для оцінки продуктивності мікромережі постійного струму МВТ, зокрема продуктивності і ефективності запропонованого алгоритму керування. Загальні результати моделювання представлені за трьома показниками, а саме: аналіз результатів роботи вітрової турбіни, аналіз результатів роботи електричної системи та аналіз системи керування.

#### 3.8.1 Результати роботи вітрової турбіни

Система моделюється для різних швидкостей вітру. При цьому вихідна напруга на клеммах підвищувального перетворювача підтримується постійною і максимально наближеною до максимальної напруги в залежності від швидкості вітру. Це робиться для оцінки ефективності запропонованого алгоритму

керування МРРТ. На рис. 3.14 показано профіль швидкості вітру як функцію часу; в моделюванні розглядаються чотири різні швидкості вітру. Початкова швидкість вітру становить 5 м/с, потім швидкість збільшується до 7 м/с, потім через короткий проміжок часу швидкість зростає до 11 м/с і, нарешті, до 12 м/с.

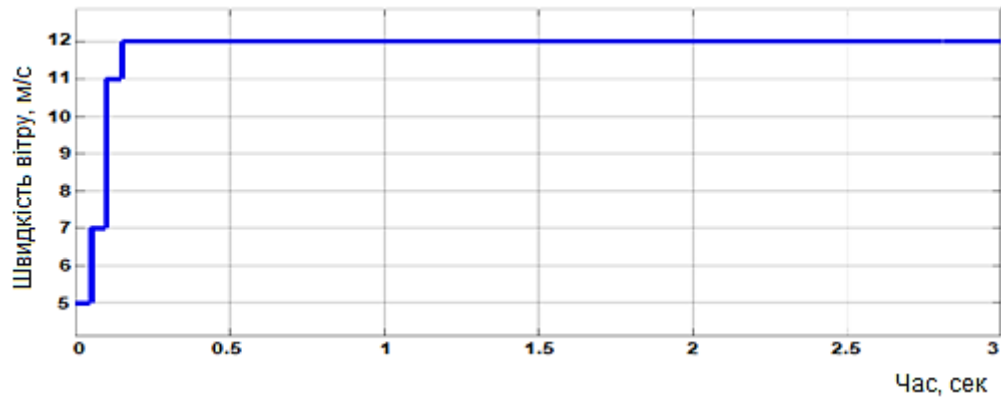


Рисунок 3.14 - Змінна швидкість вітру

Для кожної швидкості вітру швидкість обертання ротора турбіни буде приводити генератор до максимальної потужності. Очікується, що система буде генерувати номінальну потужність 3 кВт при швидкості вітру 12 м/с. Отже, при швидкості вітру, меншій за номінальну, мікромережа постійного струму МВТ генерує потужність, меншу за номінальну потужність 3 кВт. Механічна потужність турбіни буде слідувати кривій оптимальної потужності з невеликим перевищенням при зміні швидкості вітру, і генератор може видобувати максимальну потужність при змінних швидкостях вітру. Моделювання проводиться протягом 3 с. Для зміни швидкості від 5 м/с до 12 м/с вводиться крок зміни в 0,05 с. Після цього швидкість підтримується постійною.

Зі збільшенням швидкості вітру також спостерігається збільшення потужності, що генерується, що призводить до збільшення потужності на вихідному затискачі інвертора (напруга і струм). Коли швидкість вітру становить 5 м/с, вихідна потужність МВТ становить близько 860 Вт. Потім ця потужність випрямляється для отримання постійного струму. Підвищувальний перетворювач, встановлений між випрямлячем і навантаженням, підвищує напругу постійного струму до відповідної максимальної напруги на основі

алгоритму MPPT. Коли швидкість вітру досягає 7 м/с, вихідна потужність ВЕУ збільшується до 1,4 кВт. При цій потужності вихідна напруга змінного струму на виході ВЕУ становить близько 80 В. Після випрямлення підвищувальний перетворювач збільшує напругу постійного струму до відповідної максимальної напруги на основі алгоритму MPPT. Коли швидкість вітру зростає до 11 м/с, вихідна потужність ВЕУ збільшується до 1,74 кВт, а напруга - до 99,5 В. Потім ця напруга випрямляється і підвищується, щоб дозволити підключення навантаження постійного струму. При номінальній швидкості вітру 12 м/с потужність досягає 3 кВт при напрузі 114 В змінного струму, випрямленій до постійного, а потім підвищеній до 240 В.

На рис. 3.15 показано криву зміни кута нахилу ВЕУ в залежності від часу. Як зазначено в Таблиці 3.3, значення кута нахилу було обрано рівним нулю градусів, як це має місце для більшості малих вітрогенераторів. На рисунку 3.15 також видно, що кут тангажу залишається постійним і дорівнює 0 градусів протягом усього часу моделювання.

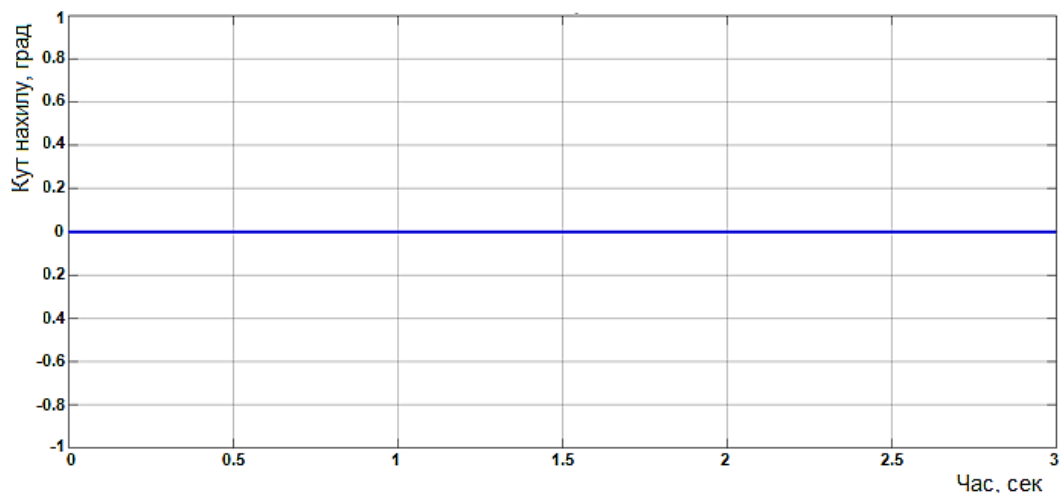


Рисунок 3.15 - Кут нахилу

### 3.8.2 Результати моделювання МВТ

Вихідна напруга на клеммах МВТ зображена на рис.3.16; сигнал демонструє перерегулювання 2%, що означає спотворення сигналу напруги

нижче його стаціонарного значення, а перерегулювання, що означає спотворення сигналу напруги вище його стаціонарного значення, становить 0,456%. При цьому час наростання становить 146,362 мс. Від початкового стану при  $t = 0$  с до  $t = 0,039$  с напруга зростає до 40,5 В, потім при  $t = 0,053$  с знову зростає до 56,55 В, і, нарешті, стаціонарне значення напруги 114 В досягається при  $t = 0,4$  с.

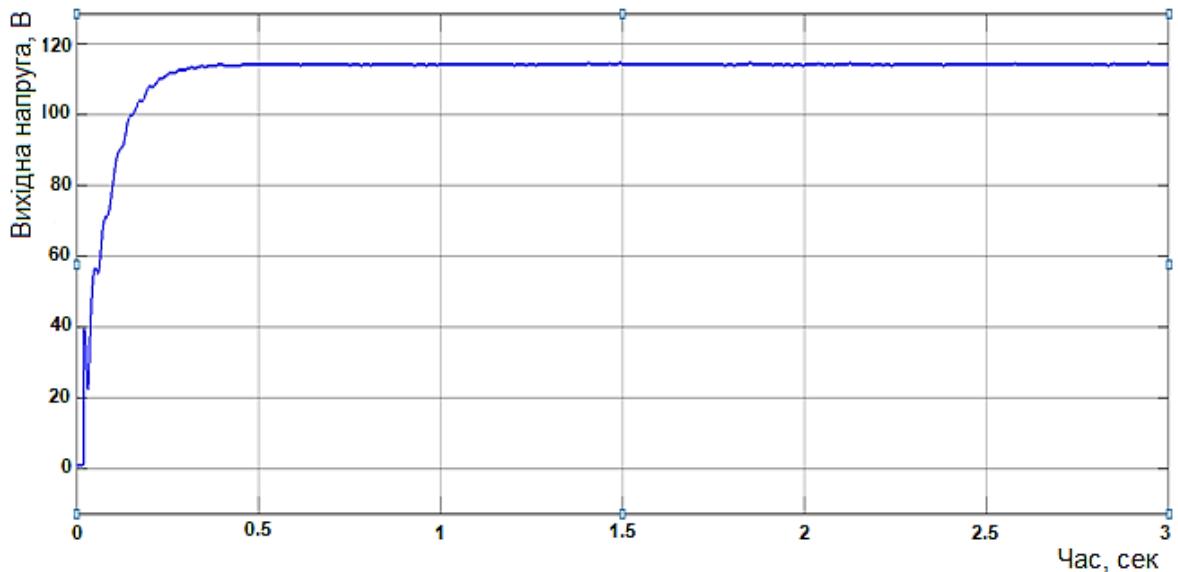


Рисунок 3.16 – Напруга, яку генерує МВТ

На рис.3.17 показано швидкість обертання ротора, виражену в рад/с; сигнал демонструє перерегулювання і проскакування 1,581 % і 0,862 %, відповідно, тоді як час наростання становить 99,98 м/с. Початкова швидкість вітру становить 5 м/с, що відбувається між  $t = 0$  с і  $t = 0,05$  с. При цій швидкості вітру швидкість обертання ротора становить близько 131,8 рад/с, між  $t = 0,05$  с і  $t = 0,1$  с швидкість вітру зростає до 7 м/с, що призводить до зростання швидкості ротора до 185,6 рад/с, між  $t = 0,1$  с і  $t = 0,15$  с швидкість вітру збільшується до 11 м/с, в результаті чого швидкість обертання ротора досягає 293,2 рад/с і, нарешті, від  $t = 0,2$  с, коли швидкість вітру, навпаки, становить 12 м/с, швидкість ротора збільшується до 320 рад/с.

Напруга від лінії до лінії на вихідних клеммах МВТ показана на рис.3.16 при стаціонарному режимі, який настає в момент часу  $t = 0,25$  с, напруга

становить близько 120 В змінного струму. Цей сигнал використовується як вхідний для випрямляча.

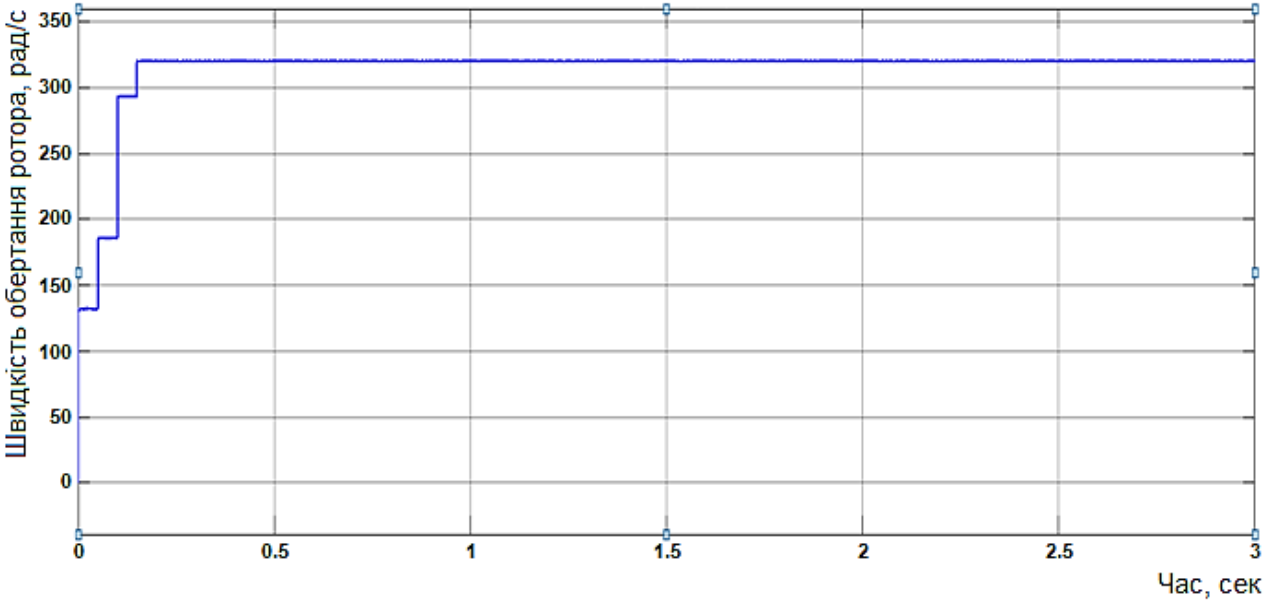


Рисунок 3.17 - Швидкість обертання ротора МВТ

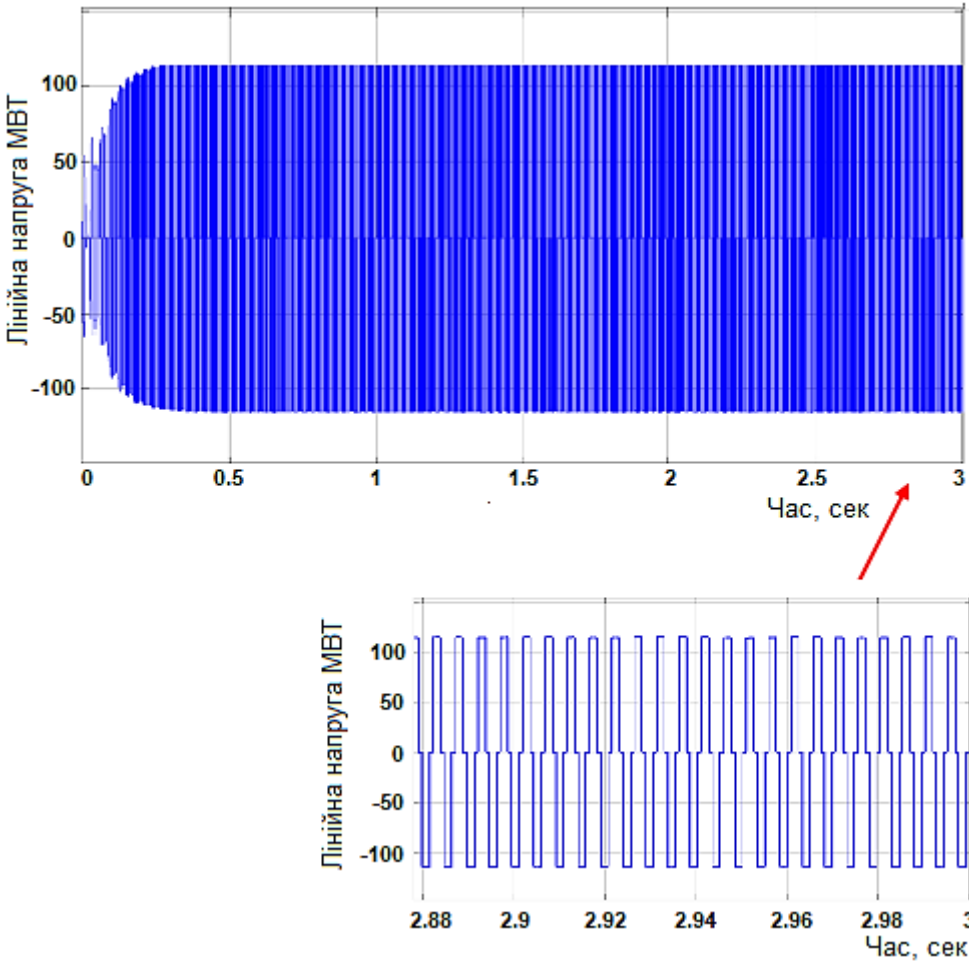


Рисунок 3.18 - Лінійна напруга МВТ



Спотворення струму статора СГПМ відбувається до моменту часу  $t = 0,15$  с. Після цього струм статора залишається стабільним на рівні близько 25 А, після перегулювання на 0,995 %, як показано на рис.3.19. Струм змінюється зі зміною швидкості вітру. Для швидкості вітру 5 м/с струм становить приблизно 15 А, а для швидкості вітру 11 м/с - близько 29,9 А.

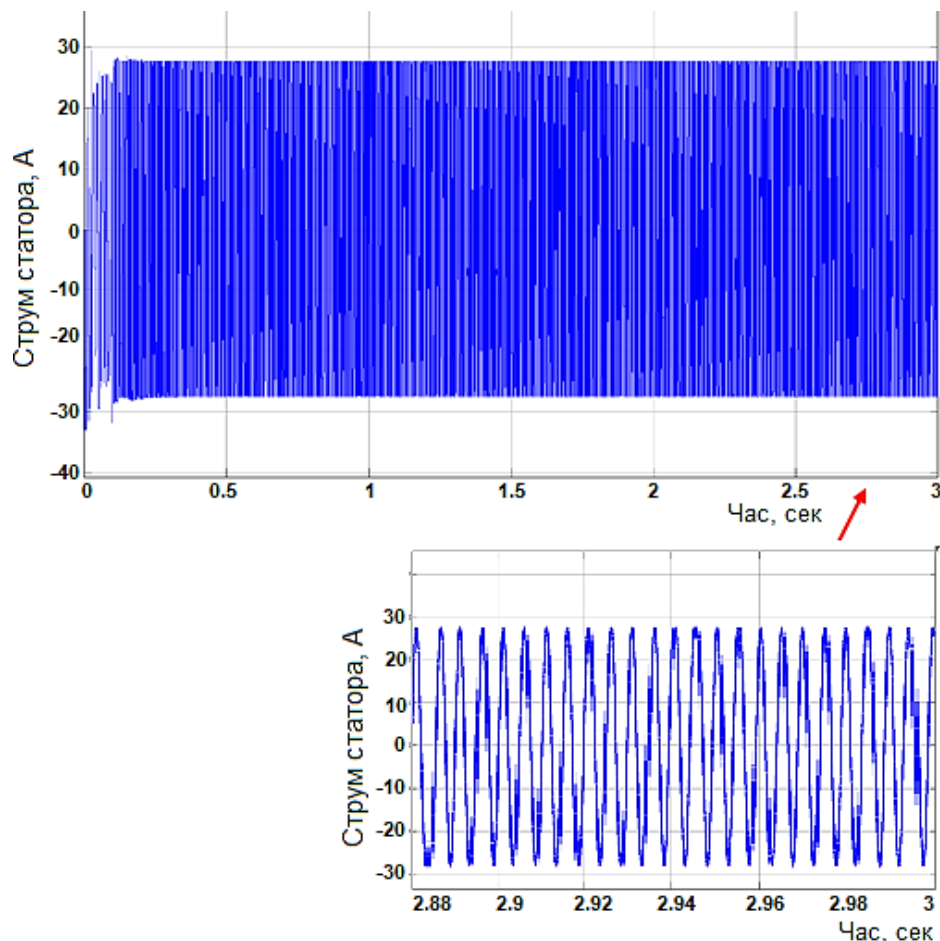
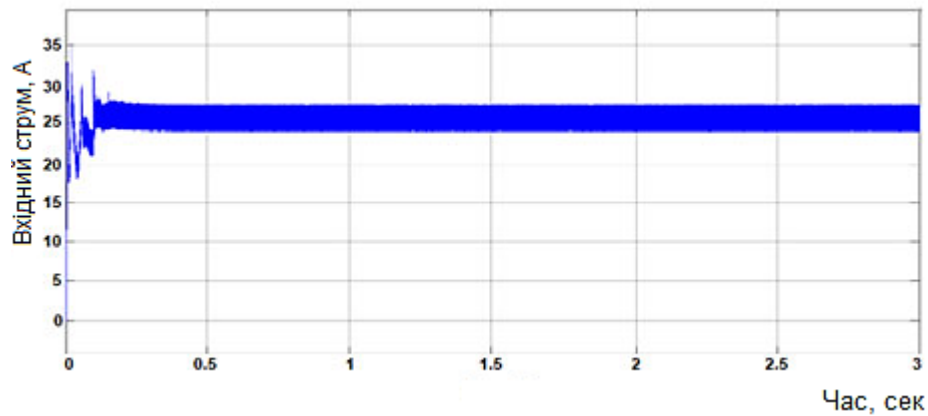


Рисунок 3.19 - Струм статора СГПМ

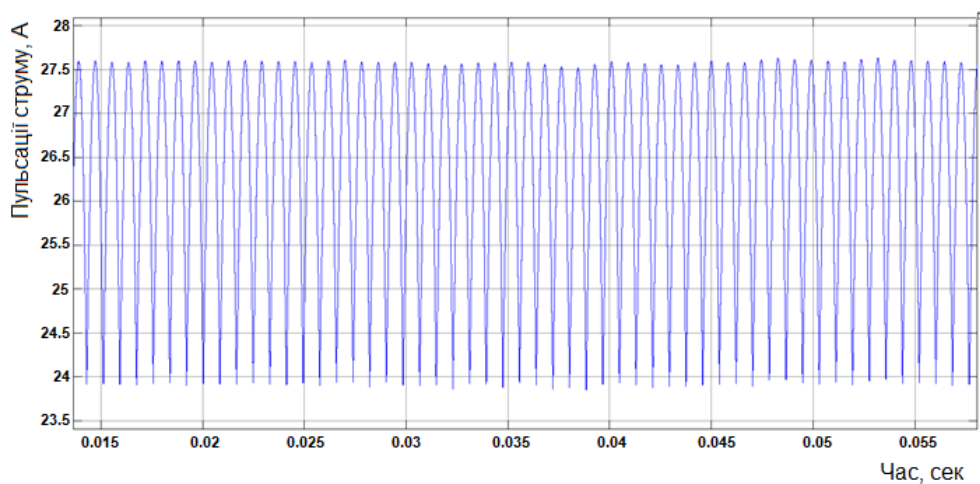
### 3.8.3 Аналіз результатів роботи підвищувального перетворювача постійного струму

На вхід підвищувального перетворювача подається постійний струм потужністю 3 кВт від повномостового трифазного діодного випрямляча з напругою 120 В. На рис.3.20 показано індуктивність підвищувального перетворювача та струм пульсацій. Струм індуктивності (рис. 3.20, а)

демонструє високі коливання від початку моделювання до досягнення швидкості вітру 7 м/с. Струм досягає 35,29 А. Після цього сигнал повертається до стаціонарного значення 25 А. З іншого боку, пульсації струму індуктивності підвищувального перетворювача (рис. 3.20, б) демонструють незначні коливання в діапазоні від 24 А до 27 А.



а)



б)

Рисунок 3.20 - Струм індуктивності підвищувального перетворювача (а) та пульсації струму (б)

Напруга на вихідних клеммах повномостового діодного випрямляча показана на рис. 3.21. Її стаціонарне значення становить близько 114 В; сигнал демонструє перерегулювання та нестабільність на 0,347 % та 2,633 %, відповідно, перш ніж досягти стабільного значення. Перед стаціонарним значенням сигнал демонструє значні коливання напруги між моментами часу  $t$

$= 0$  с і  $t = 0,4$  с. Для досягнення стаціонарного значення сигналу знадобилося близько  $0,6$  с.

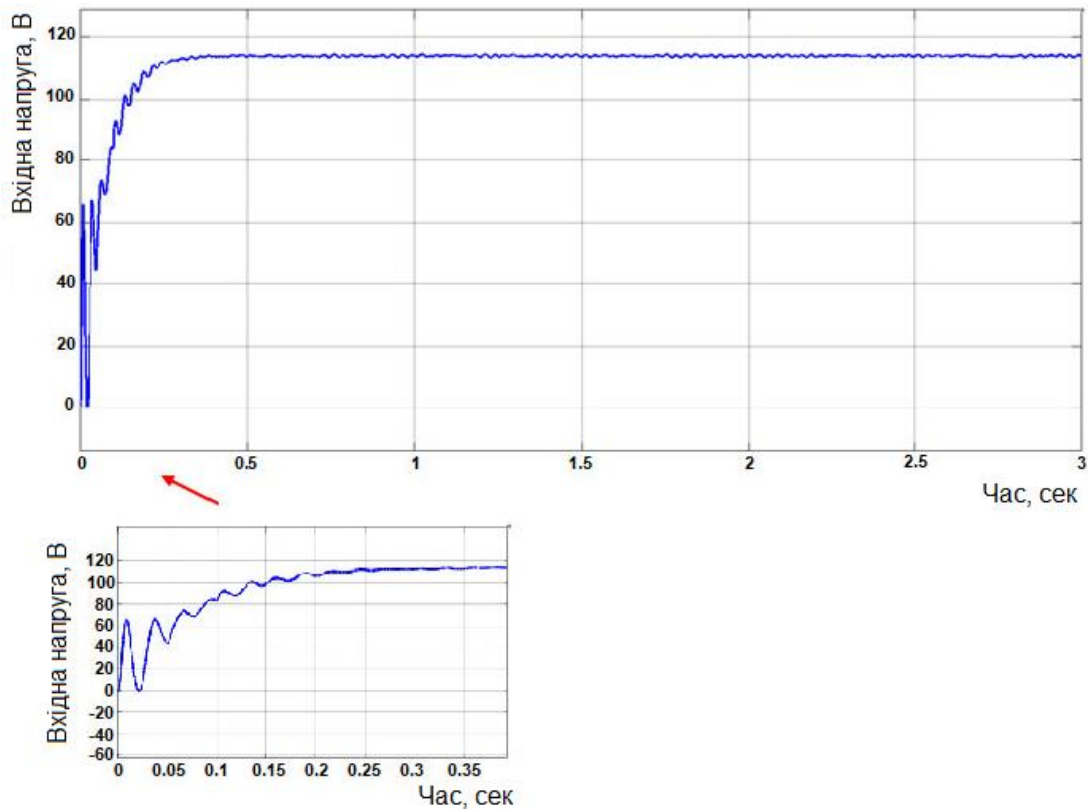


Рисунок 3.21 - Вхідна напруга підвищувального перетворювача

На рис. 3.22 показано коефіцієнт завантаження, який забезпечує контролер МРРТ на основі алгоритму Perturb and Observe; цей коефіцієнт завантаження відображає періоди увімкнення та вимкнення, які використовуються для керування перемикачем підвищувального перетворювача для досягнення МРР.

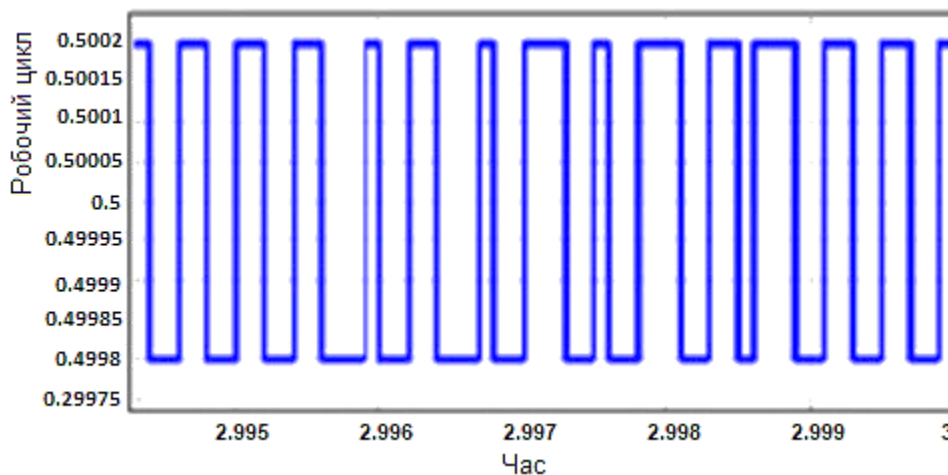


Рисунок 3.22 - Робочий цикл з використанням алгоритму Р&О МРРТ

З рисунку видно, що в залежності від умов експлуатації контролер МРРТ забезпечує зміну коефіцієнта завантаження в межах від 0,4998 до 0,5002.

Вихідний струм підвищувального перетворювача зображено на рис. 3.23 він характеризується перерегулюванням 0,774 % та неперерегулюванням 2,131 %, а час наростання становить 126,918 мс. Стаціонарне значення струму (12,5 А) настає через 0,4 с і відповідає швидкості вітру 12 м/с. Спочатку цей струм дорівнює 4,26 А при швидкості вітру 5 м/с між  $t = 0$  с і  $t = 0,05$  с, потім, при зміні швидкості вітру до 7 м/с між  $t = 0,1$  с і  $t = 0,15$  с, струм збільшується до 8,88 А, потім швидкість вітру знову змінюється до 11 м/с між  $t = 0,15$  с і  $t = 0,2$  с, і струм збільшується до 11 А, поки не досягне свого стаціонарного значення 12,5 А.

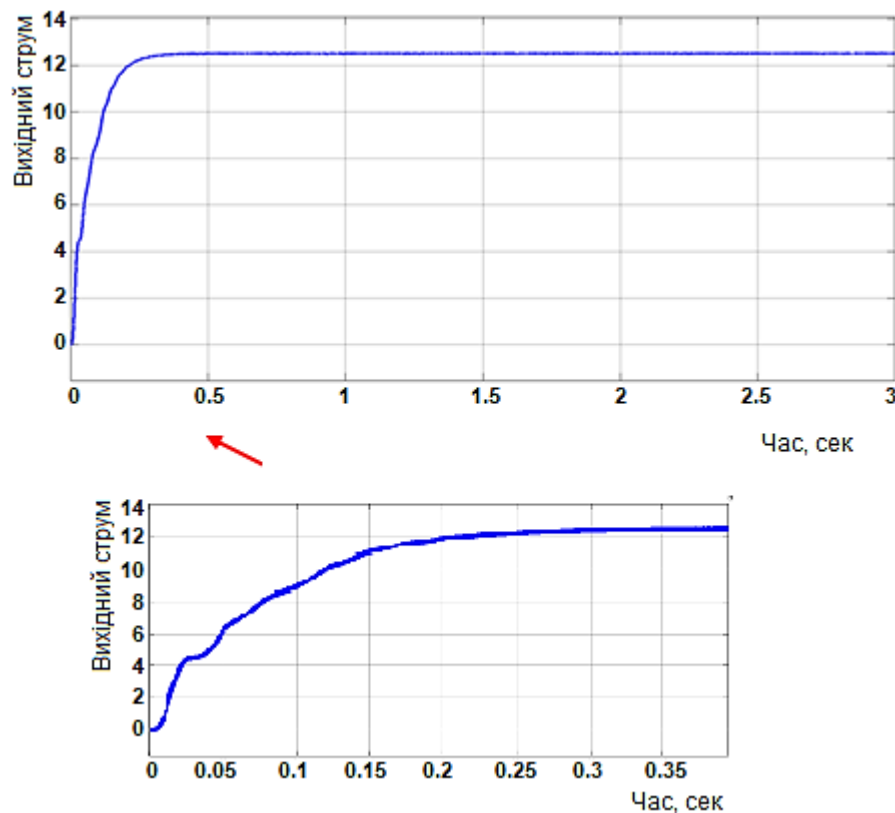


Рисунок 3.23 - Вихідний струм підвищувального перетворювача

Вихідна напруга підвищувального перетворювача зображена на рис. 3.24, вона характеризується часом наростання 138,532 мс. Стале значення напруги (240 В) досягається через 0,4 с при коефіцієнті завантаження 0,5 і відповідає

швидкості вітру 12 м/с. Спочатку ця напруга дорівнює 81,78 В при швидкості вітру 5 м/с між  $t = 0$  с і  $t = 0,05$  с, потім, при зміні швидкості вітру до 7 м/с між  $t = 0,1$  с і  $t = 0,15$  с, напруга збільшується до 117,5 В, потім швидкість вітру знову змінюється до 11 м/с між  $t = 0,15$  с і  $t = 0,2$  с, і напруга збільшується до 211,5 В, поки не досягне свого сталого значення 240 В.

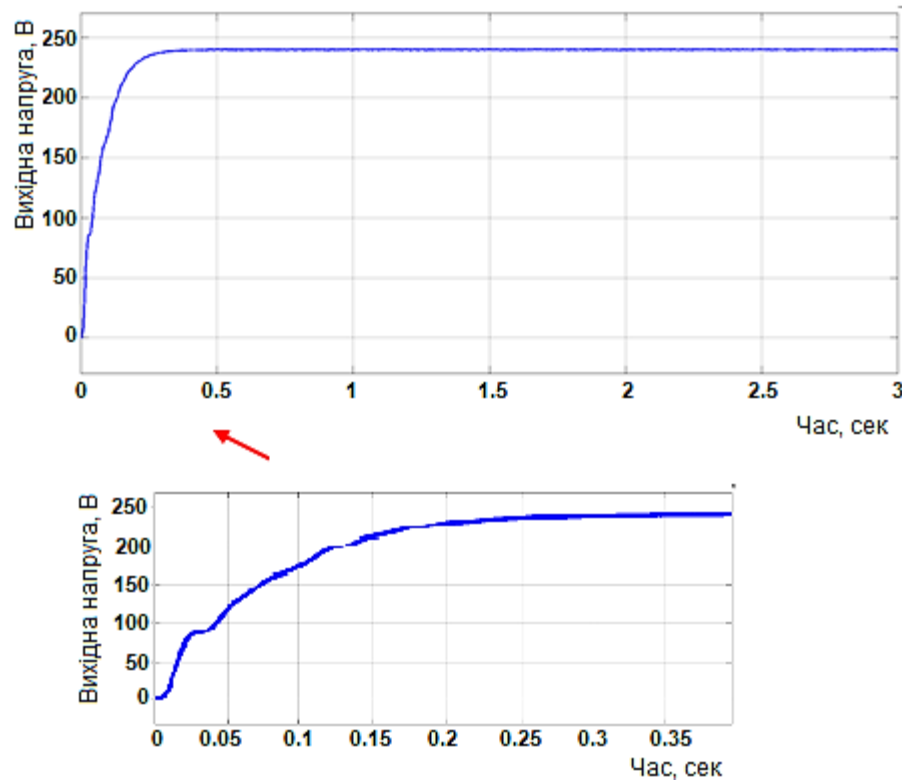


Рисунок 3.24 - Вихідна напруга підвищувального перетворювача

Вихідна потужність підвищувального перетворювача показана на рис. 3.25; вона характеризується перерегулюванням і нестабільністю 0,433 % і 2,173 % відповідно, а час наростання становить 174,712 мс. Номінальна потужність (3 кВт) досягається за 0,4 с і відповідає швидкості вітру 12 м/с. Спочатку ця потужність дорівнює 718,5 Вт при швидкості вітру 5 м/с між  $t = 0$  с і  $t = 0,05$  с, потім, при зміні швидкості вітру до 7 м/с між  $t = 0,1$  с і  $t = 0,15$  с, потужність збільшується до 1514 Вт, потім швидкість вітру знову змінюється до 11 м/с між  $t = 0,15$  с і  $t = 0,2$  с, і потужність збільшується до 2330 Вт, поки не досягне свого номінального значення 3 кВт

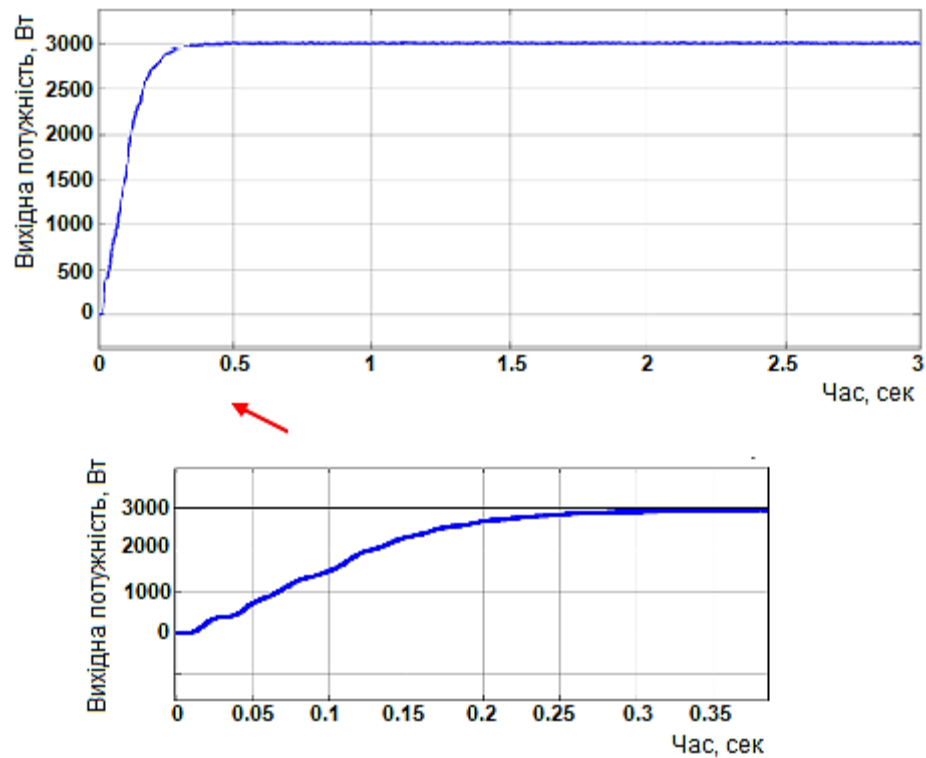


Рисунок 3.25 - Вихідна потужність підвищувального перетворювача за різних умов з використанням P&O MPPT

### 3.9 Висновки до розділу

1. Розроблено модель мікромережі постійного струму МВТ.
2. Представлено детальний профіль навантаження,
3. Описано модель аеродинаміки вітру.
4. Описано модель компонент мікромережі, такі як синхронний генератор з постійними магнітами, повномостовий діодний випрямляч і підвищувальний перетворювач постійного струму в постійний.
5. Описано модель контролера P&O MPPT для відстеження максимальної потужності при одночасному регулюванні вихідної напруги підвищувального перетворювача.
6. Проведено аналіз та обговорення результатів, отриманих в результаті моделювання, а саме: результати роботи вітротурбіни і результати перетворювача постійного струму в постійний.

7. Результати моделювання вітрової турбіни були зосереджені на аеродинаміці вітрової турбіни, включаючи швидкість вітру і кут нахилу вітроколеса.

8. Результати МВТ включали результати моделювання напруги та струму моделі СДПМ потужністю 3 кВт, яка використовувалася в цьому дослідженні.

9. Результати роботи перетворювача постійного струму на постійний включали в себе напругу, струм і потужність перетворювача з використанням контролера P&O MPPT.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Вплив шуму на організм людини та розробка заходів щодо його зниженню до допустимих величин

Шкідливий та небезпечний вплив шуму на організм людини безперечно існує. Ступінь такого впливу переважно залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини. Дія шуму може спричинити нервові, серцево-судинні захворювання, виразкову хворобу, порушення обмінних процесів та функціонування органів слуху. Із загальної кількості захворювань, останнім часом значно зросла частка тих, які спричинені саме шумовим впливом. У зв'язку з цим, слід звернути увагу на той факт, що протягом багатовікової еволюції людина так і не набула здатності адаптуватись до дії шуму, як і не було створено природного захисту для високочутливого та досконалого органу слуху людини від дії інтенсивного шуму [25].

Наближено дію шуму різних рівнів можна охарактеризувати у такий спосіб. Шум до 50 дБА, зазвичай, не викликає шкідливого впливу на людину в процесі її трудової діяльності. Шум з рівнем 50—60 дБА може викликати психологічний вплив, що виявляється у погіршенні розумової діяльності, послабленні уваги, швидкості реакції, утрудненні роботи з масивами інформації. За рівня шуму 65 — 90 дБА можливий його фізіологічний вплив, пульс прискорюється, тиск крові підвищується, судини звужуються, що погіршує постачання органів кров'ю.

Дія шуму з рівнем 90 дБА і вище може призвести до функціональних порушень в органах та системах організму людини: знижується слухова чутливість, погіршується діяльність шлунку та кишківника, з'являється відчуття нудоти, головний біль, шум у вухах. При рівні шуму 120 дБА та вище



здійснюється механічний вплив на орган слуху, що виявляється у порушенні зв'язків між окремими частинами внутрішнього вуха, можливий навіть розрив барабанної перетинки. Такі високі рівні шуму впливають не лише на органи слуху, а й на весь організм. Звукові хвилі, проникаючи через шкіру, викликають механічні коливання тканин організму, внаслідок чого відбувається руйнування нервових клітин, розриви дрібних судин.

Заходи, що до зниження рівня шуму, спроектованні для вітроенергетичної установки індивідуального електропостачання:

- вибір тихохідної конструкції установки, рівень шуму від роботи якої є значно менший ніж при роботі швидкохідних конструкцій;
- використання трифазного генератора будова якого забезпечує зміщення катушок відносно магнітів  $2/3$  за рахунок чого навантаження розподіляється рівномірно і рівень вібрації та шуму нижчий ніж у генераторів однофазного виконання.

Норми шуму на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 “Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”. Нормування шуму враховує характер роботи та умови технологічного процесу.

Вимірювання шуму проводиться на постійних робочих місцях у приміщеннях, на території підприємств, на промислових спорудах та машинах (в кабінах, на пультах управління).

## **4.2 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 [25].

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва тощо.

Як попередньо зазначалось, 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, пац 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.

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити 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, тощо;

– електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробіі 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.

### **4.3 Цивільний захист на об'єкті енергетики**

ЦЗ об'єкта організовується по типовій структурі з урахуванням особливостей виробництва.

Начальником ЦЗ об'єкта є його керівник (директор, ректор, голова правління, начальник і так далі). Він несе повну відповідальність за організацію і стан ЦЗ, управляє силами і засобами ЦЗ, а також проведенням аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт [26,27].

Керівництво підприємств, установ та організацій незалежно від форми власності і підпорядкування забезпечує своїх працівників засобами індивідуального і колективного захисту, організовує здійснення евакуаційних заходів щодо працівників та майна об'єкта, створює сили для ліквідації наслідків НС; забезпечує їх готовність до практичних дій; створює диспетчерські служби, виконує інші заходи щодо цивільного захисту і несе пов'язані з цим матеріальні і фінансові витрати в порядку та обсягах, передбачених законодавством.

Радіаційні, хімічні і вибухонебезпечні підприємства додатково створюють локальні автоматизовані системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайної ситуації та оповіщення персоналу і населення, що проживає в зонах можливого ураження; запроваджують інженерно-технічні

заходи, що зменшують ступінь ризику виникнення аварій, пожеж та вибухів, і несуть витрати щодо їх здійснення в обсягах, передбачених відповідними нормативно-правовими актами.

Власники потенційно небезпечних об'єктів відповідають за захист населення, яке проживає в зонах можливого ураження, від наслідків аварій на цих об'єктах.

#### **4.4 Організація оповіщення персоналу об'єктів та населення про НС техно-генного і природного характеру**

Залежно від причин походження подій, що зумовили або можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території України, розрізняють надзвичайні ситуації техногенного, природного, соціального та воєнного характеру, а в залежності від обсягів заподіяних наслідків, кількості постраждалих і загиблих, обсягів технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, надзвичайні ситуації класифікуються як державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівня [26,27].

До надзвичайних ситуацій техногенного характеру зараховуються транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд та будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, електроенергетичних системах, аварії в системах нафтогазового промислового комплексу, на очисних спорудах, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах.

До надзвичайних ситуацій природного характеру зараховуються небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні явища, деградація ґрунтів чи надр, пожежі в природних екосистемах, зміни стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність та масове отруєння людей, інфекційні захворювання сільськогосподарських тварин, масова загибель диких тварин, ураження сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками.

Оповіщення населення про загрозу та виникнення НС, своєчасне та достовірне інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи.

З метою виконання завдання у всіх ланках міських і позаміських пунктів на основі автоматизованих систем централізованого оповіщення, мережі зв'язку і радіомовлення, а також спеціальних засобів, створюється система оповіщення та інформаційного забезпечення. Вона являє собою комплекс організаційно-технічних засобів для передачі відповідних сигналів і розпоряджень органам державної виконавчої влади, адміністрації підприємств, установ і організацій, силам ЦЗ і населенню.

Автоматизована система оповіщення та інформаційного забезпечення створюється на базі загальнодержавної мережі зв'язку та радіомовлення і поділяється на державну і регіональну. Система має забезпечити циркулярне оповіщення посадових осіб із застосуванням для цього міської телефонної мережі, засобів радіомовлення і телебачення.

Система оповіщення та інформаційного забезпечення використовується централізовано.

Сповіщення підлеглих штабів ЦЗ і НС, сил ЦЗ і населення організує вищестоящий штаб ЦЗ і НС.

Здійснюється опрацювання інформації про НС, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків НС

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дана робота присвячене проектуванню та моделюванню мікромережі постійного струму невеликої вітрової турбіни для забезпечення електроенергією побутового навантаження у випадку дефіциту або перебоїв в електропостачанні.

1. Проведено огляд роботи мікромереж постійного струму в автономному режимі, а також малих вітрових турбін, включаючи їх компоненти та поточний ринок.
2. Виконано огляд підходів до керування потужністю вітрових турбін та алгоритми відстеження точки максимальної потужності.
3. Проведено коротке дослідження автономної малої вітрової турбіни в мікромережах постійного струму, в тому числі вибір місця, технології, топології силових електронних перетворювачів та методи визначення точки максимальної потужності.
4. Розроблено модель мікромережі постійного струму малої вітротурбіни і описано профіль навантаження, модель аеродинаміки вітру, модель компонент мікромережі, такі як синхронний генератор з постійними магнітами, повномостовий діодний випрямляч і підвищувальний перетворювач постійного струму в постійний.
5. Для перевірки ефективності розробленої системи розроблена модель мікромережі постійного струму малої вітрової турбіни в MATLAB Simulink. Загальні результати показали хорошу продуктивність системи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беднарівський А. С. Відновлювальні джерела енергії як шлях для надійного електропостачання // А. С. Беднарівський; Р. В. Волошин; О. Р. Фари́на; О. Р. Джигринюк / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 164.

2. Левчук П. П. Зарядка електричних транспортних засобів на основі безпроводної передачі енергії / П. П. Левчук, 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. 117. — (Електротехніка та енергозбереження).

3. Kumar, J., Agarwal, A., & Agarwal, V. (2019). A review on overall control of DC microgrids. *Journal of energy storage*, 21, 113-138.

4. 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 (ITTAР 2023).

5. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні 75 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.

6. 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

7. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній

системі //Ю.Б.Керяя, 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.

8. 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.

9. Філюк Я. О. Світлотехнічні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей з акумулюючими елементами / Філюк Я. О., Андрійчук В. А., Коваль В. П. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу“, 15-17 жовтня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 185-186.

10. Рудик А. І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки / А. І. Рудик, В. П. Коваль // XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 7-8 грудня 2022 року. — Т. : ТНТУ, 2022. — С. 70. — (Електротехніка та енергозбереження).

11. Kishore, R. A., Coudron, T., & Priya, S. (2013). Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 116, 21-31.

12. Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., & Kouro, S. (2011). *Power conversion and control of wind energy systems (Vol. 76)*. John Wiley & Sons.

13. El Chaar, L., Lamont, L. A., & Elzein, N. (2011, July). Wind energy technology—Industrial update. In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE.

14. Nayar, C., Dehbonei, H., & Chang, L. (2005, September). A low cost



power electronic interface for small scale wind generators in single phase distributed power generation system. In Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (pp. 25-28).

15. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130. — (Прикладні застосування механіки в задачах енергозбереження).

16. Rosato, M. A. (2018). Small wind turbines for electricity and irrigation: design and construction. CRC Press.

17. Rakesh, N., Nitya, A., & Ram, G. (2014, July). Modelling and simulation of the wind energy electric conversion system to extract the maximum power from the wind using matlab. In 2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD) (pp. 1-6). IEEE.

18. Haque, M. E., Muttaqi, K. M., & Negnevitsky, M. (2008). A control strategy for output maximisation of a СПІМ-based variable-speed wind turbine. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 5(3), 263-270.

19. Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Adetokun, B. B. (2017). Optimal capacitance selection for a wind-driven self-excited reluctance generator under varying wind speed and load conditions. Applied Energy, 190, 339-353.

20. Daili, Y., Gaubert, J.P. & Rahmani, L. (2015). Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors. Energy Conversion and Management, 97: 298–306.

21. John, A.R. & Divya, N.A. 2016. Performance Comparison of Grid Integrated Micro Wind System with Diode Rectifier and Active Rectifier. : 2370–2375.

22. Ayodele, T.R., Ogunjuyigbe, A.S.O. & Adetokun, B.B. 2017. Optimal capacitance selection for a wind-driven self-excited reluctance generator under

varying wind speed and load conditions. *Applied Energy*, 190: 339–353.

23. Matayoshi, H., Howlader, A.M., Datta, M. & Senju, T. 2018. Control strategy of СГПМ based wind energy conversion system under strong wind conditions. *Energy for Sustainable Development*, 45: 211–218.

24. Fan, S., Lim, T., Zhang, H. & Finney, S. 2011. Design and control of wind energy conversion system based on resonant DC/DC converter. *Generation (RPG 2011)*.

25. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

26. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с

27. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «цивільна безпека»/ автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.