МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз енергетичного потенціалу та розробка вітроенергетичної установки для промислового об’єкту

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1411-з
спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

освітньої програми
(назва освітньої програми)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)

Новіков Р.Г.
(ініціали та прізвище)
Керівник проф., проф., д.т.н. Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент асистент Коваленко І.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)_рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

д.т.н., доц. В.Л. Коваленко

“_10_” __травня__2025 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу студенту

_____ Новіков Роман Геннадійович _____

1. Тема роботи: Аналіз енергетичного потенціалу та розробка вітроенергетичної установки для промислового об’єкту
Керівник роботи: __проф._Артемчук В.В._____
затверджені наказом ЗНУ від «_27_»_грудня__2024__року №_2029-с___

2. Строк подання студентом роботи: 10 травня 2025 року___

3. Вихідні дані до роботи: поточний тариф вартості електроенергії; технічні параметри вітрової установки; об’єми споживання електричної енергії приймачем; технічні дані електропривода вітрової установки

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити): Вступ; 1) Огляд сучасних ВДЕ систем; 2) Аналіз вітроенергетичних установок; 3) Покращення ефективності роботи вітроенергетичних установок; Висновки

5. Перелік графічного матеріалу: 1) титульна сторінка; 2) ВДЕ системи 3) вітрогенераторні установки; 4) електропривод установок; 4) принципова схема ланки «перетворювач частоти – асинхронний двигун»;

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., проф.		
Розділ 2	Артемчук В.В., проф.		
Розділ 3	Артемчук В.В., проф.		
Нормоконтроль	Коваленко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання 30.12.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз систем відновлювальної енергетики	01.10.2024	
2	Особливості РОБОТИ вітроенергетичних установок	01.11.2024	
3	Удосконалення роботи ВЕУ	01.12.2024	

Студент _____ Новіков Р.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи _____ Артемчук В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтролер _____ Коваленко І.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Новіков Р.Г. Аналіз енергетичного потенціалу та розробка вітроенергетичної установки для промислового об’єкту.

Дипломна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Артемчук В.В. Запорізький національний університет, Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025 рік.

У роботі розглянуто шляхи покращення ефективності роботи вітроенергетичних установок. Визначено елементи, які впливають на енергоефективність, і розроблено методи оптимізації. З метою підвищення стабільності та продуктивності вітроенергетичних систем в умовах України розроблено рекомендації щодо впровадження нових технологій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВДЕ, енергоефективність, вітроенергетичні установки, вітрогенератори, інноваційні технології.

ЗМІСТ

ВСТУП 6

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 8

1.1 Аналіз світового споживання енергоресурсів 8

1.2 Класифікація ВДЕ 12

1.3 Енергетичний потенціал України 19

2 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК 24

2.1 Класифікація ВЕУ 28

2.2 Аналіз силових елементів ВЕУ 32

2.3 Конструктивні особливості та принцип дії вітрових генераторів 39

3 УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ ВЕУ 43

3.1 Напрямки підвищення ефективності ВЕУ 43

3.2 Оцінка енергопотенціалу вітрової енергії в Україні 45

3.3 Удосконалення системи керування ВЕУ 49

3.4 Оцінка техніко-економічного ефекту від впровадження ВЕУ 54

ВИСНОВКИ 58

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 60

ДОДАТКИ 62

70

ВСТУП

Зменшення залежності від викопних джерел енергії та перехід на використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є основною метою сучасних змін у сфері енергетики. Це пов’язано з меншою кількістю запасів традиційних паливних ресурсів, а також потребою в зниженні викидів парникових газів. Як одна з найперспективніших сфер виробництва електроенергії (ВДЕ), енергетика демонструє постійний ріст і залучає значні інвестиції у всьому світі. Тим не менш, якість роботи вітроенергетичних установок (ВЕУ) значною мірою залежить від низки параметрів, включаючи характеристики вітрового потоку, конструктивні особливості обладнання та застосування нових технологій. Удосконалення цих елементів призводить до підвищення енергоефективності та економічної доцільності вітрових установок. Це особливо важливо для України, оскільки країна прагне зміцнити свою енергетичну автономію в умовах військових дій.

Мета цієї роботи полягає в тому, щоб проаналізувати сучасні методи підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок, створити обґрунтування для покращення техніко-економічних показників цих установок і запропонувати поради щодо впровадження нових технологій у цій галузі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

- проаналізувати тенденції розвитку ВДЕ, зокрема вітроенергетики;
- вивчити характеристики вітрових потоків і їх вплив на ефективність роботи ВЕУ;
- дослідити основні типи вітроенергетичних установок, їх класифікацію та конструктивні особливості;
- вивчити сучасні технології генерації електроенергії у ВЕУ, включаючи типи генератор.

Дослідження стосується процесів, за допомогою яких вітроенергетичні установки виробляють електроенергію, а також того, як вони працюють і як вони пов’язані з енергетичною системою.

Дослідження має на меті підвищити ефективність використання вітроенергетичних установок шляхом вдосконалення конструктивних рішень, оптимізації процесів перетворення енергії вітру на електричну енергію та підвищення ефективності використання вітрового потенціалу.

Важливість цієї роботи полягає в тому, що вона спрямована на вирішення однієї з найважливіших проблем енергетичного сектору: забезпечення стабільності та ефективності роботи електроенергії (ВДЕ). Новий підхід не тільки зменшить залежність від викопного палива, але й допоможе досягти енергетичних і екологічних цілей країни.

Таким чином, мета дослідження полягає в тому, щоб вирішити поточні проблеми енергетики, пов’язані з підвищенням ефективності вітроенергетичних установок, а також розробити практичні рекомендації щодо їхнього впровадження в Україні.

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Аналіз світового споживання енергоресурсів

Загалом попит на електрику зростає, а структура споживання змінюється, що призводить до переходу до екологічних джерел. Через індустріалізацію та зростання населення світове споживання енергії постійно зростає. Країни, що розвиваються, такі як Індія та Китай, демонструють найбільший приріст. І можна сказати, що світове споживання енергії є основним індикатором технологічного прогресу та економічного розвитку. Структура та кількість енергоспоживання відображають як регіональні, так і світові тенденції.

Хоча вугілля, нафта та газ все ще складають близько 80 % глобального енергобалансу, частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) постійно зростає завдяки прогресу в технологіях і кліматичним цілям. Основним джерелом викидів CO2 є традиційні викопні джерела. Отже, прагнення зменшити викиди CO2 спонукає до використання альтернативних джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітрової та сонячної енергетики. Крім того, необхідно адаптуватися до Паризької кліматичної угоди.

Енергетична незалежність є ще одним важливим компонентом, який необхідний для розвитку енергетики. Стабільність енергосистем загрожує геополітичним ризикам, зокрема залежності від імпорту газу та нафти. З лютого 2022 року рашистська федерація наносить терористичні удари на українську енергетичну інфраструктуру. Можна з упевненістю припустити, що потреба в енергетиці зростатиме. У сучасному світі близько 760 мільйонів людей не мають доступу до електроенергії [1].

Саме тому, росія намагається знищити енергетику нашої країни, що є черговим доказом геноцидної війни проти України. Одним із напрямків розвитку енергетики є використання відновлювальних джерел енергії, оскільки досвід війни показав, що енергетика має бути кардинально змінена.

Окрім того, що це зменшує навантаження на навколишнє середовище та запаси природних копалин, використання електроенергії дає можливість створити енергосистему більш стабільною та незалежною від зовнішніх впливів. Крім того, слід пам’ятати, що зменшення запасів викопних енергоносіїв викликає необхідність диверсифікації енергетичних джерел. До 2050 року частка ВДЕ у загальному енергобалансі має зрости до 50 % [2].

Структура світового споживання первинної енергії 1.1 [1 – 3].

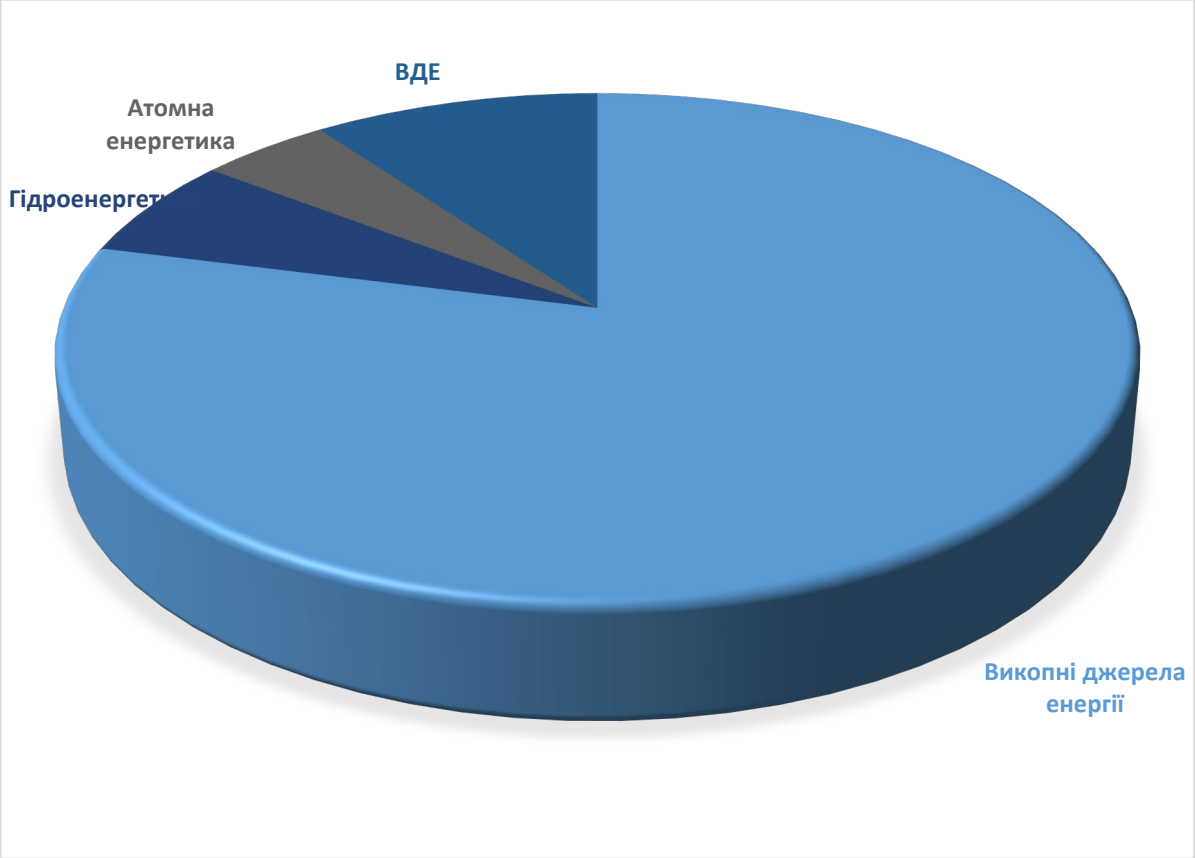


Рисунок 1.1 – Структура світового енергоспоживання:

викопні джерела ~ 79 %;

гідроенергетика ~ 6,4 %;

атомна енергетика ~ 4,6 %;

ВДЕ ~ 10 %

Структуру світового енергоспоживання викопних джерел енергії наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Структура світового енергоспоживання викопних джерел енергії

Розподіл вироблення відновлювальних джерел енергії наведено на рисунку 1.3.

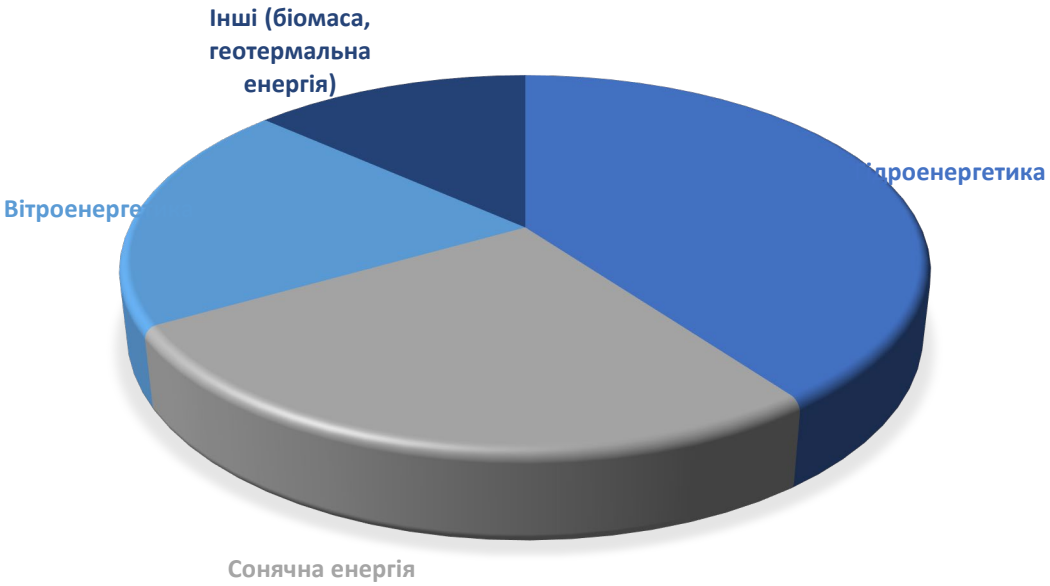


Рисунок 1.3 – Розподіл вироблення відновлювальних джерел енергії: гідроенергетика ~ 6 %; сонячна енергія ~ 4 %; вітроенергетика ~ 3 %, інші (біомаса, геотермальна енергія) ~ 3 %

Транспортний сектор споживає найбільше нафти, складаючи приблизно 65 % загального споживання. На добу споживається 88…90 мільйонів барелів нафти. США споживають найбільше нафти, становлячи приблизно 20 % від світового споживання, а Китай споживає лише 14 %. Наприклад, спалювання нафти викликає відомі екологічні проблеми; викиди CO2 становлять приблизно 2,3 кг на літр спаленого палива.

Сфера енергетики є основним споживачем природного газу. Близько 40 % спожитого газу використовується для виробництва електроенергії. Обсяг споживання приблизно становить 4 трлн кубометрів. Газ є більш екологічним джерелом енергії, ніж вугілля.

Близько 70 відсотків загального споживання вугілля припадає на електроенергетику. Близько 8 млрд тонн споживається. Індія та Китай є найбільшими споживачами вугілля. Приблизно 2,2 тонн CO_2 викидається на тонну спаленого вугілля, що робить це паливо шкідливим для навколишнього середовища. У результаті відбуваються викиди твердих часток і сірки.

З обсягом виробництва близько 4300 ТВт/год гідроенергетика наразі є лідером серед відновлюваних джерел енергії (рис. 1.3). Вплив на екосистему та залежність від сезонності є відомими проблемами використання гідроенергетики.

Встановлена потужність сонячної енергетики становить приблизно 1200 ГВт. Китай досяг найбільшого успіху в цій галузі, досягнувши понад 35 % від загального обсягу, тоді як США досягли лише 12 %. Незважаючи на це, важливо пам’ятати, що сонячна енергетика активно розвивається.

Вітряна енергетика виробляє приблизно 850 ГВт встановленої потужності. Китай має 36 %, США 16 % і Німеччина 9 %. Крім того, електроенергія активно розвивається. Крім того, використання біомаси є перспективним напрямком. Європейський Союз виробляє 60 % біоенергії.

Багато людей все ще сперечаються про атомну енергетику. Утилізація ядерних відходів і безпека є проблемами з одного боку. З іншого боку, це

найдешевша форма електроенергії, і не викликає викидів парникових газів. Сполучені Штати є лідером у галузі атомної енергетики.

Таким чином, хоча частка відновлюваних джерел енергії поступово зростає, викопне паливо продовжує бути лідером у структурі світового енергоспоживання. Зміни у світовому енергетичному балансі будуть спричинені технічними досягненнями, спрямованими на підвищення ефективності ВДЕ, а також політикою, спрямованою на зменшення викидів CO_2. До 2050 року частка відновлюваної енергії має перевищити 50%, щоб забезпечити енергетичну безпеку та екологічну сталість.

1.2 Класифікація ВДЕ

Всі енергетичні ресурси на Землі, які є результатом безперервної діяльності Сонця, поділяються на дві основні категорії. Перша включає природні акумулювання; друга, як правило, не відновлювана, але постійно відновлювана. До першої групи належать запаси паливних копалин, такі як нафта, буре вугілля, кам'яне вугілля, сланці, торф і підземні гази, а також енергія, вироблена термоядерами та ядерами. Сонячне випромінювання, вітер, потоки річок, морські хвилі та припливи та внутрішнє тепло Землі входять до другої групи.

Ресурси енергії, які можуть бути перетворені на корисну роботу та постійно відновлюють енергетичну цінність, відомі як відновлювані джерела енергії. Інакше кажучи, традиційні джерела енергії обмежені запасами, тоді як відновлювані джерела енергії постійно відновлюються. Рисунок 1.4 показує класифікацію відновлюваних джерел енергії [5].

Таблиця 1.1 – Потенційні запаси джерел енергії Землі

Види енергії	Запаси енергії
Не відновлювані види енергії (кВт•год)	
Термоядерна енергія	$100000000 \cdot 10^{12}$
Ядерна енергія	$574000 \cdot 10^{12}$
Відновлені види енергії (кВт•год/рік)	
Енергія сонячних променів	$667800 \cdot 10^{12}$
Енергія морів та океанів	$70000 \cdot 10^{12}$
Енергія вітру	$17360 \cdot 10^{12}$

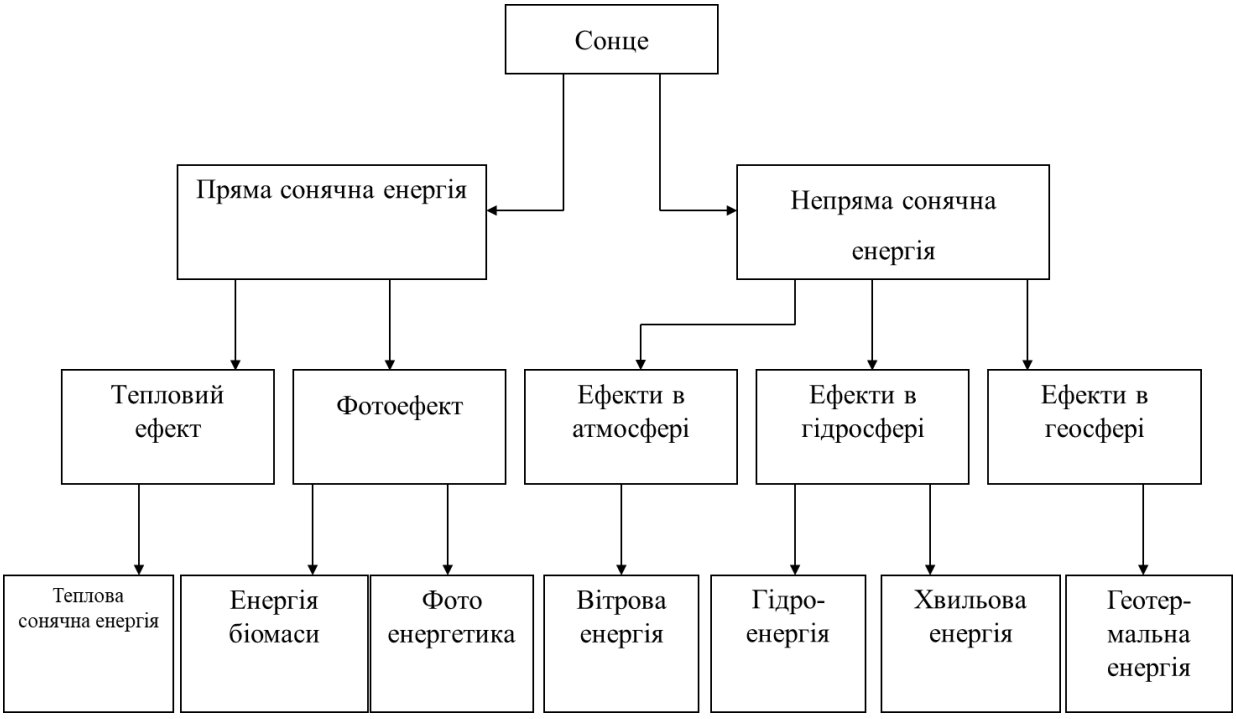


Рисунок 1.4 – Класифікація відновлюваних джерел енергії

У результаті прямої сонячної діяльності відбуваються тепловий ефект і фотоефект, що призводить до того, що Земля отримує світло та теплову енергію. Непряма діяльність Сонця впливає на атмосферу, гідросферу та геосферу, що викликає вітри, хвилі, регулює течії річок і створює умови для збереження внутрішньої теплоти Землі.

Відновлювані джерела енергії мають кілька переваг порівняно з традиційними джерелами енергії. Вони майже не вичерпні, не забруднюють

довкілля, не потребують видобутку, переробки та транспортування палива, не потрібно використовувати воду для охолодження, видалення золи, відходів чи продуктів розпаду, не потрібно дефіцитних високотемпературних матеріалів, за винятком сонячних концентраторів теплоти, і вони можуть працювати без

Більшість відновлюваних джерел енергії мають великий недолік – вони залежать від погодних умов.

Вичерпання розвіданих запасів органічного палива в найближчому майбутньому призведе до необхідності використання поновлюваних джерел енергії. Це пов’язано з тим, що потреба в електричній енергії швидко зростатиме. За деякими прогнозами, споживання енергії через п’ятдесят років зросте в середньому у 3…4 рази, а в розвинених країнах у 5…6 разів. Крім того, вуглекислий газ, окиси азоту та сірки,

Дефіцит традиційних паливно-енергетичних ресурсів в Україні, сприятливі клімато-метеорологічні умови для використання основних видів поновлюваних джерел енергії, а також наявність промислової бази, придатної для виробництва майже всього обладнання для поновлюваних джерел енергії, визначають необхідність і можливість розвитку енергетики на основі відновлюваних джерел в Україні.

Завдяки використанню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) можна досягти екологічно безпечного енергетичного розвитку. Використовуючи природні ресурси, які відновлюються в природному циклі, вони забезпечують виробництво енергії без шкоди для довкілля.

Сонячна енергія. Сонячно-термальні системи (CSP) і фотовольтаїчні системи (PV) є двома типами геліосистем, залежно від їх конструкції та призначення.

Як показано на рис. 1.5, сонячно-термальні системи (CSP) використовують сонячне тепло для нагріву води або виробництва електроенергії за допомогою парових турбін. Як правило, ці системи використовують для гарячого водопостачання, але все більше людей використовують їх для опалення, щоб отримати додаткову теплову енергію.

Системи для перетворення теплової енергії в електричну енергію мають іншу конструкцію, але їхні принципи дії однакові. Як би там не було, сонячні колектори дозволяють використовувати сонячну енергію для задоволення потреб.

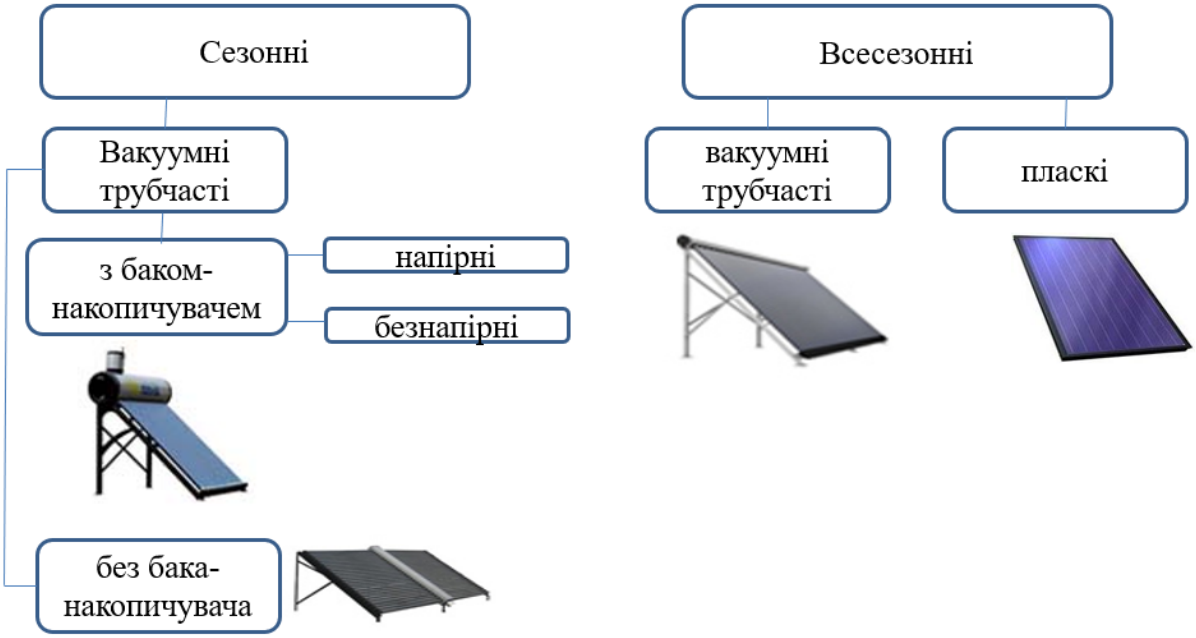
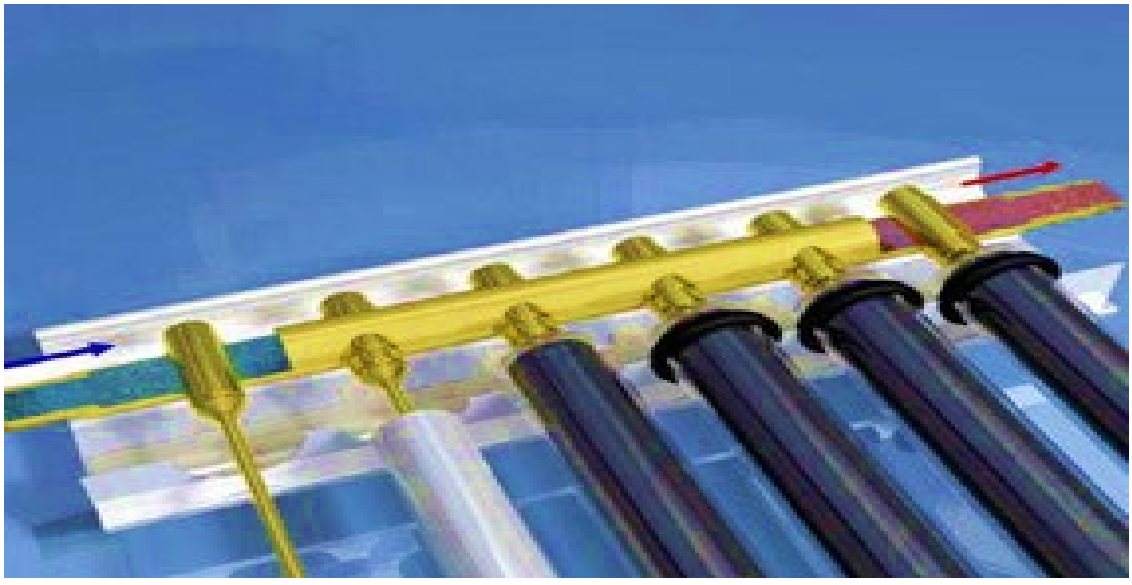
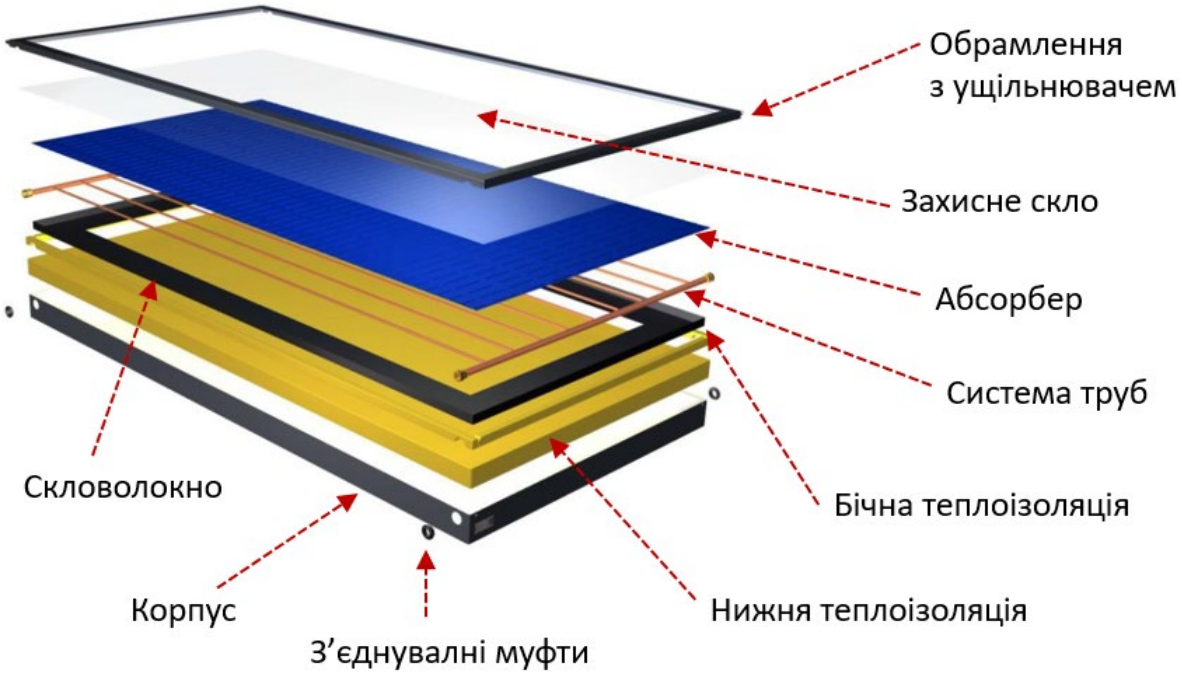


Рисунок 1.5 – Сонячні колектори для нагріву води

Конструктивні особливості всесезонних сонячних колекторів наведені на рисунку 1.6 [6].



а)



б)

Рисунок 1.6 – Конструктивні особливості всесезонних сонячних колекторів: а) трубчасті; б) пласкі

Фотоенергетика є додатковим широко поширеним застосуванням сонячної енергії. Сонячні панелі використовуються в фотовольтаїчних системах (PV) для перетворення світла в електроенергію.

Звичайні сонячні панелі мають ефективність від 13 до 17 відсотків. Однак при застосуванні спеціальних технологій, таких як використання активного охолодження або застосування спеціальних матеріалів, ефективність може зрости до 30 відсотків.

Для створення фотомодулів використовують різні матеріали [6, 7]:

- фотоелементи на основі шарових структур GaInP-GaAs-Ge, GaInP-GaAs-CuInSe2, A-Si-C-Si (TF);

- фотоелементи на основі арсеніда гіллія GaAs (PC, MC, TF) та фосфіда індія InP (PC);

- фотоелементи на основі органічних фарбників полімерів (OPV/DSC/DYSC);

- фотоелементи на основі теллуріда кадмія Cd-Te (TF);

- фотоелементи на основі деселеніда галлія-міді-індія Cu(In,Ga)Se2 CIGS (TF);

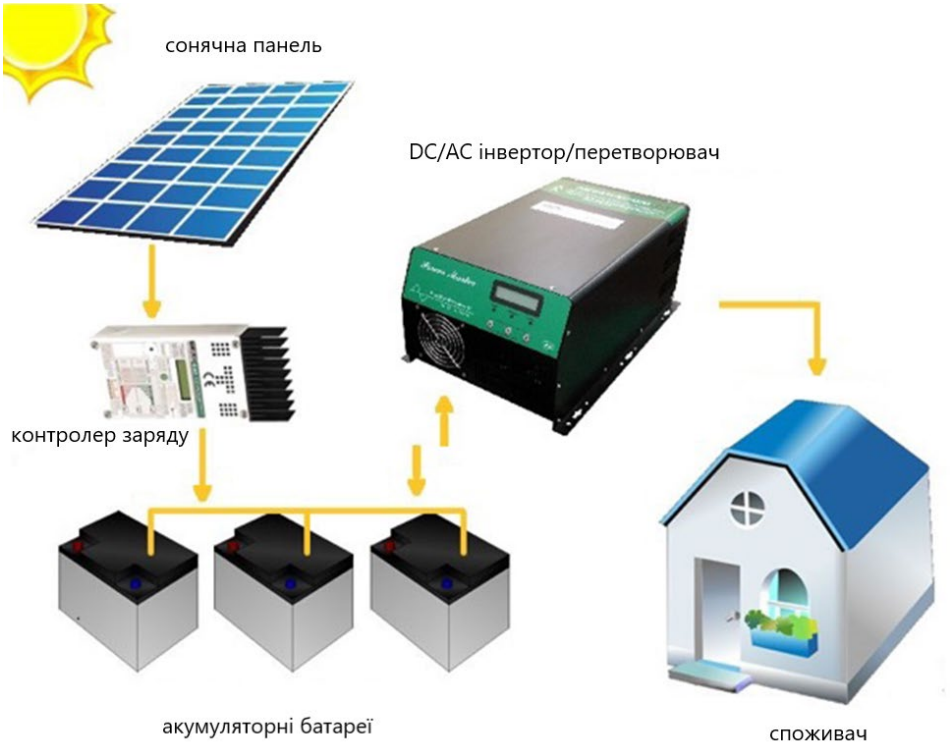
- фотоелементи на основі Si (C, PC/MC, TF, A, NC, String Ribbon).

Фотомодулі розроблені для систем з різними напругами. 12-вольтні фотомодулі використовуються переважно в автономних системах споживачів і зарядних пристроїв для акумуляторів; 24-вольтні фотомодулі, які мають більшу напругу, використовуються в середніх системах для споживачів із більшою потребою в енергії; і 48-вольтні фотомодулі. Більш висока напруга зменшує струм у кабелях. Використовуються в великих сонячних системах, таких як мережеві, промислові, комерційні та автономні системи; мережеві високовольтні фотомодулі, підключені до інверторів, можуть мати напругу понад 600 В для ланцюгів із кількома модулями. - Напруга відкритого кола (OCV) використовується великими сонячними електростанціями. Технічні характеристики кожного модуля визначають максимальну напругу відкритого кола. Наприклад, напруга для 12-вольтних модулів Voc становить 18…22 В, а напруга для 24-вольтних модулів становить 36…44 В.

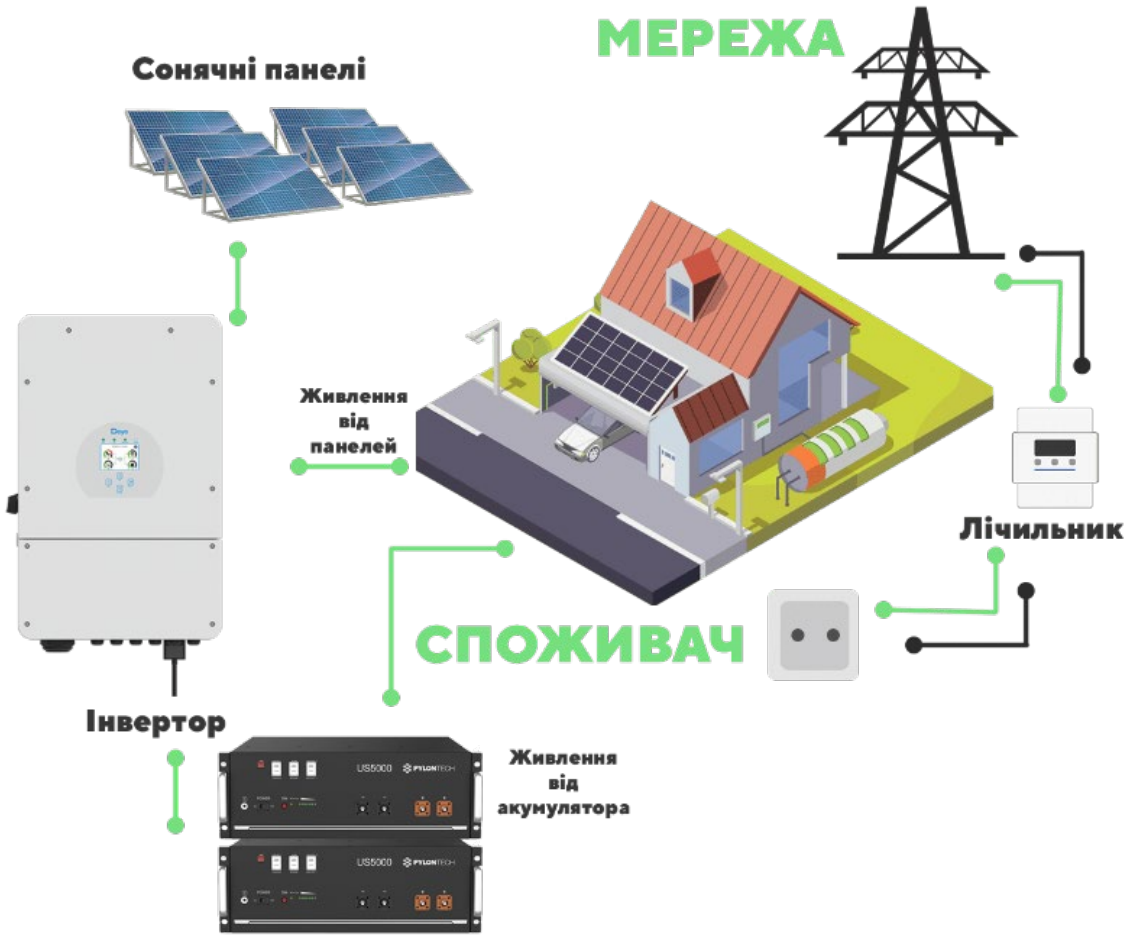
Сонячні електростанції для відносно невеликих споживачів класифікуються за принципом взаємодії з мережею: «на мережі», «на мережі» або гібридні (рис. 1.7) [6 - 8].



а)



б)



в)

Рисунок 1.7 – Сонячні електростанції:

а) On-grid; б) Off-grid; в) гібридна

Вітроенергетика має кілька типів установок. Наземні вітроелектростанції розташовані на суші, де швидкість вітру постійна; офшорні вітроелектростанції розташовані на морських платформах із великим потенціалом вітрової енергії.

Вітроенергія має ряд переваг, включаючи можливість масштабування та високу ефективність у вітряних районах. Недоліками є шумовий вплив на навколишнє середовище, високі витрати на монтаж офшорних установок і непередбачені руйнування вітряних установок.

Гідроелектростанції (ГЕС) працюють за допомогою енергії потоків води. Міні-ГЕС ідеально підходять для річок малого розміру, що робить їх привабливими для використання на місцевому рівні.

Виробництво електроенергії або теплопостачання можливе за допомогою геотермальної енергетики, яка використовує тепло, що виробляється в земній корі. Плюсом цього типу енергетики є те, що він не залежить від погоди та забезпечує стабільність енергетичного потоку. Але локальність застосування через особливі геологічні умови та висока вартість буріння свердловин є проблемами. Газ виробляється біогазовими установками з органічних відходів. Біомасові електростанції виробляють енергію, спалюючи біомасу.

1.3 Енергетичний потенціал України

Енергетичний потенціал нашої країни включає відновлювані джерела енергії та органічні копалини природних енергетичних ресурсів. Електроенергетика та паливна промисловість складають паливний енергетичний комплекс (ПЕК) України. Вуглевидобувна, газова, нафтова та нафтопереробна, торф’яна та атомна промисловості — це лише деякі з процесів, які складають паливну промисловість. ПЕК є складною системою, яка включає видобуток, виробництво та використання палива та енергії, а

також транспортування, розподіл і використання цих ресурсів. Він є основою для будь-якої держави. Зокрема, темпи, масштаби та техніко-економічні показники всього виробництва, зокрема в промисловості, сільському господарстві та транспорті, залежать від його розвитку.

Зазначимо, що в Україні було досягнуто рекордних видобутків різних видів ПЕР: 218 млн. т вугілля в 1976 році, 14,4 млн. т нафти, зокрема газового конденсату, у 1972 році та 68,7 млрд. м3 природного газу в 1975 році. Вугілля, кам'яне та буре є основними органічними ресурсами нашої країни. Кам'яне вугілля має 94,5% ресурсної бази, а буре вугілля має 5,5%. У 1721 році на Донбасі були відкриті перші родовища вугілля в Україні.

Однак частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) поступово збільшується в Україні, незважаючи на значну залежність країни від викопних видів палива. Згідно з даними Державної служби статистики України та Міністерства енергетики, структура кінцевого споживання електроенергії в 2021 році була такою:

- промисловість – 41,7 %;
- населення – 30,9 %;
- комунально-побутове господарство – 12,0 %;
- транспорт – 4,9 %;
- сільське господарство – 2,9 %;
- будівництво – 0,8 %;
- інші непромислові споживачі – 6,8 %;

Загальне споживання електроенергії в Україні в 2021 році становило 154 825,7 млн кВт·год, що на 5,7% більше, ніж у минулому році. Відпуск електроенергії споживачам (нетто) зріс на 6,4 відсотка і становив 125 482,9 млн кіловат-години.

Важливо відзначити, що структура енергоспоживання в Україні значно змінилася через військові дії та економічні зміни. Зокрема, споживання електроенергії населенням та промисловістю в опалювальний сезон 2022–2023 років знизилося на 42,5% порівняно з опалювальним сезоном 2021–2022 років,

досягнувши 18,9 млрд кВт·год. Тим не менш, у наступному опалювальному сезоні 2023–2024 років споживання зросло на 16,4 відсотка, досягнувши 22 млрд кВт·год [7]. У структурі виробництва електроенергії в Україні за 2021 рік було вироблено 156 575,7 млн кВт·год [8 - 10].

Загалом оцінюється, що в надрах України може бути до 300 млрд. т вугілля. Західні експерти стверджують, що світові запаси газу та нафти вистачать на 90 років, а запаси вугілля на 350 років, а запаси вугілля в Україні вистачать на 400 років. Це дозволяє визначити вугілля як основний енергетичний ресурс України та розглядати сучасну вугільну енергетику як пріоритетну. Розвідані запаси вугілля за категоріями в Україні становлять 52,6 млрд. т, балансові, позабалансові та прогнозовані ресурси вугілля становлять 117,3 млрд. т, з них коксівний вугілля становить 17,7 млрд. т (31%), а антрацити становлять 8,3 млрд. т (11,5%). У розробці та підготовці до освоєння знаходяться 23,6 млрд. т запасів [8 - 10].

Більшість важливих родовищ нафти в Україні вже досягли майже проектного рівня вичерпання. Наприклад, рівень видобутку нафти з Лелякевського родовища становив 59% при проектному рівні 62,2%; Гнідинцівського родовища становив 61,1% і 62,2%; Прилуцького родовища 53,2% і 56,6%; Качанєвського родовища 43,5% і 45,6%; і Долинського родовища 30,6% і 33,7%. Хоча вітчизняні НПЗ виробляють майже 60 млн т на рік, вони не завантажені повністю. Приблизно на 29% потужності українських НПЗ завантажені [8 - 10].

Під час будівництва соляних шахт у Прикарпатті в 1901–1902 роках було виявлено видобуток газу в Україні. Перші промислові надходження в районі Калуша були отримані на Дашавському родовищі в 1921 році. У 1924 році було прокладено перший газопровід від Дашави до Стрию. Нафта та природні горючі гази знаходяться в цих місцях. Наразі у Прикарпатському районі використовуються такі важливі родовища газу: Рудківське, Опарське, Ходновицьке, Битківське, Калуське та Кадобнянське. Наразі запаси Дашавського родовища практично вичерпані. Воно використовується для

зберігання газу. Прикарпаття має високий вміст метану (до 98 %) у природному газі.

У Криму є великі родовища природного газу, такі як Джанкойське, Глібівське, Задорнянське, Західно-Жовтневе та Краснополянське, які входять до Причорноморського нафтогазоносного району. Загальні запаси тут становлять 1254 млрд кубічних метрів. У 1960 році було виявлено джерела газу в Північному Криму, а в 1970-х роках — під Азовським морем. Зараз більшість шельфових родовищ залишаються нерозвіданими; десять родовищ було знайдено на глибині менше 60 м. Шмідта та Галицинське родовища є найбільшими на шельфі Південної України. У експлуатації зараз 115 газових родовищ із балансовими запасами природного газу 830 млрд кубічних метрів. Загальні запаси газу в різних категоріях перевищують 1120 млрд. кубічних метрів.

У відновлювальній енергетиці Україна має певний потенціал. Наша країна знаходиться в Східній Європі, тому її клімат помірно-континентальний. Однак у південних частинах Європи, особливо в Причорномор'ї та Криму, він більш субтропічний середземноморський. У тіні температура може бути вище 40 градусів Цельсія влітку, а взимку до 30 градусів морозу. Ці спостереження показують труднощі, з якими стикаються енергетики та будівельники. Таким чином, необхідно знайти енергоефективні рішення для вирішення проблем, пов'язаних з охолодженням та обігрівом будівель. При проектуванні ВДЕ також важливо враховувати клімат регіону та середні погодні умови. Наприклад, південні регіони мають значний потенціал для сонячної енергетики, тоді як вітрова енергетика переважно розташована в степових і прибережних районах. За підтримки Європейської комісії система географічних даних PVGIS створила карту потенціалу сонячної енергії та річної інсоляції для України (рис. 1.8). Однак слід враховувати, що в нормальних умовах потужність сонячного випромінювання може коливатись від 0 до 1000 Вт/м^2.

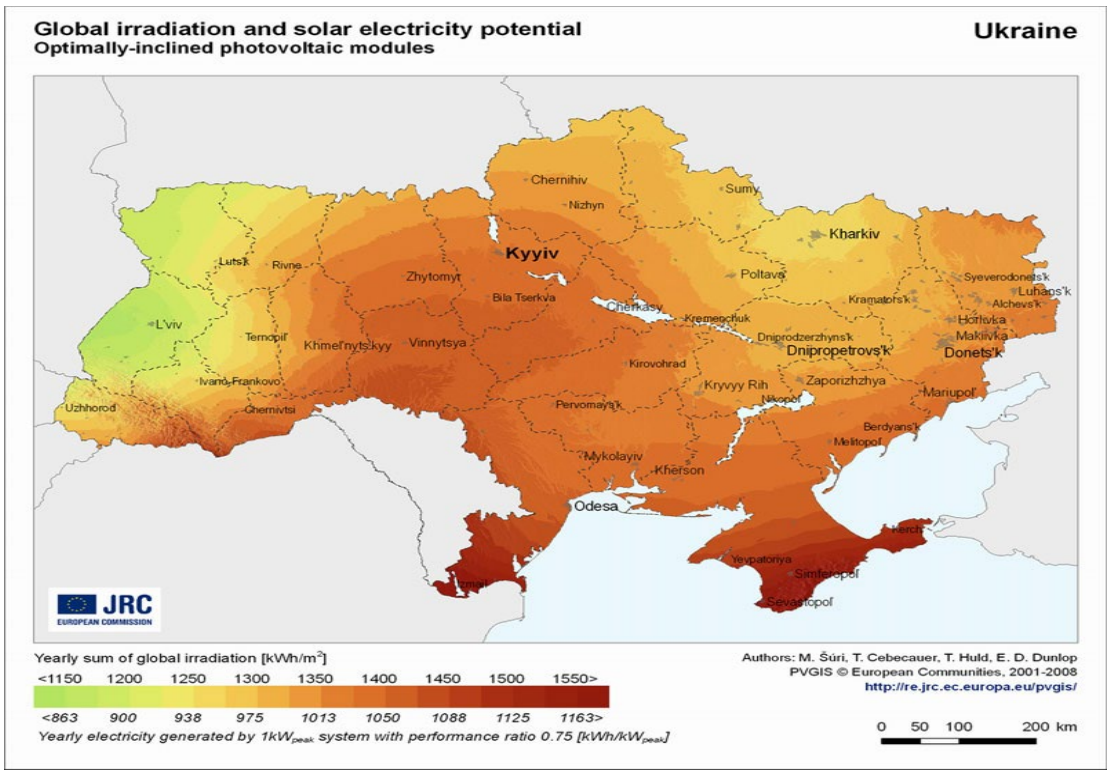


Рисунок 1.8 – Географічні та кліматичні фактори (за даними PVGIS)

Ресурси відновлюваних джерел енергії в Україні, їхній енергетичний потенціал та обсяги використання наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Ресурси відновлюваних джерел енергії України

Джерела енергії	Теоретичний потенціал, МВт•год/рік	Використовуються, МВт•год/рік	Технічний потенціал, МВт•год/рік
Геліоенергетика	$720{,}0 \cdot 10^9$ 10^9	$81{,}0 \cdot 10^3$	$0{,}13 \cdot 10^9$
Вітроенергетика	$965{,}0 \cdot 10^9$	$0{,}8 \cdot 10^3$	$0{,}36 \cdot 10^9$
Геотермальна, енергетика	$5128{,}0 \cdot 10^9$	$0{,}4 \cdot 10^3$	$14{,}0 \cdot 10^9$
Біоенергетика	$12{,}5 \cdot 10^6$	$0{,}014 \cdot 10^3$	$6{,}1 \cdot 10^6$
Мала гідроенергетика	$17{,}4 \cdot 10^6$	$0{,}5 \cdot 10^6$	$6{,}4 \cdot 10^6$

Отже, можна бачити, що Україна має чималий потенціал відновлюваних джерел енергії України. Особливо, це стосується геліоенергетики, вітроенергетики та геотермальної енергетики.

2 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Фізичні параметри визначають поведінку вітрового потоку та вплив на об’єкти, такі як вітрові турбіни, будівлі та природні об’єкти. Основні характеристики вітрового потоку включають:

- швидкість вітру;
- щільність повітря;
- напрямок вітру;
- турбулентність;
- частотний розподіл швидкості вітру;
- висота вітрового потоку;
- енергія вітру;
- градієнти температури та тиску;
- вплив рельєфу.

Розглянемо коротко ці параметри.

Для розрахунків швидкість вітру (v) вимірюють у м/с або км/год і є ключовим параметром, що визначає потенційну енергію вітру для перетворення в механічну або електричну.

Залежність потужності від швидкості визначають як:

$$P \propto v^3$$

Висота над рівнем землі визначає швидкість вітру. Вітер сповільнюється через тертя землі, коли він близько до неї. Отже, вітри сильніші на високих висотах, ніж на землі. Коли висота над поверхнею землі збільшується в два рази, швидкість вітру збільшується приблизно на 12% на сільськогосподарських полях і пустельних територіях.

На характер земної поверхні та географічні умови значною мірою впливає швидкість вітру. Ці умови включають різні природні та штучні перешкоди, включаючи пагорби, дерева та будівлі. З цієї причини ВЕУ

розташовують на висотах і віддалених від високих дерев, житлових будинків і інших споруд, оскільки ці перешкоди знижують швидкість вітру і сприяють завихренню потоку, що ускладнює перетворення енергії вітру.

Середньорічна швидкість вітру є показником вітрового потенціалу території. Це середня арифметична швидкість вітру за рік. Крім того, середні швидкості вітру можна розрахувати для різних періодів, наприклад, місячні, денні та вартові.

Загальна кількість енергії, яка переноситься вітром кубічно залежить від швидкості вітру. Вітряна енергія збільшується в шість разів. Таким чином, вітер зі середньою швидкістю 4 м/с може виробляти приблизно в два рази більше енергії, ніж вітер зі середньою швидкістю 5 м/с. Щільність повітря (ρ) - це маса повітря на одиницю об’єму (кг/м3). Температура, тиск і вологість визначають її.

Типове значення при нормальних умовах [12]:

$$\rho \approx 1{,}225 \text{ кг/м}^3.$$

Щільність впливає на кінетичну енергію вітрового потоку як:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2}\rho v^2$$

Напрямок вітру вимірюється за допомогою флюгерів і вимірюється в градусах або відносно сторін світу. Цей метод використовується для орієнтації вітрових турбін і визначення їхньої продуктивності.

Турбулентність – це коливання швидкості вітру як у просторі, так і в часі. Він залежить від природних перешкод, таких як будівлі та рельєф, і впливає на стабільність роботи вітрових турбін. Турбулентність оцінюється за допомогою коефіцієнта турбулентності (*I*):

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}$$

де

σ_v - стандартне відхилення швидкості вітру;

$\bar{v}$ - середня швидкість вітру.

Частотний розподіл швидкості вітру. Вітровий потік має мінливий характер, що підкоряється закону розподілу Вейбулла. Щільність повітря на рівні моря дорівнює 1,226 кг/м^3 при нормальному атмосферному тиску 760 мм рт. ст. і температурі +15°С. Щільність ρ знижує на 10% при висоті 1 км і на 20% при висоті 2,5 км над рівнем моря, що призводить до відповідного зниження потенціалу вітрової енергії. Щільність повітря ρ збільшується при зниженні температури, а при підвищенні знижується. Щільність повітря зростає на 10% при зниженні температури від нормального рівня (+15 ºС) на 25 ºС (до - 10 ºС), а при підвищенні температури на 25 оС (до +40 ºС) вона знижується приблизно на 7,5 %.

Щільність ймовірності розподілу [12]:

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k},$$

де

k – коефіцієнт форми;

c – масштабний параметр.

Висота вітрового потоку. Швидкість вітру змінюється з висотою над поверхнею Землі. Залежність описується експоненціальною формулою:

$$v(h) = v(h_0)\left(\frac{h}{h_0}\right)^{\alpha}$$

де:

$v(h)$ – швидкість на висоті h,

$v(h_0)$ – швидкість на висоті h_0,

α – коефіцієнт висотної залежності (залежить від типу поверхні).

Основною характеристикою вітрової енергії є нерівномірність її прояву як у просторі, так і в часі. У деяких місцях протягом року швидкість вітру на висоті 10 м від рівня землі не перевищує 3 м/с. Там не можна розраховувати на ефективність вітрових установок. Незважаючи на те, що в країні є багато місць, де можливість економічно вигідного використання енергії вітру не викликає сумнівів, вибір конкретних місць для установки ВЕУ вимагає ретельного розгляду та обґрунтування.

Кінетична енергія вітрового потоку [12, 13]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2}\rho v^3 A t$$

де:

A – площа поперечного перерізу потоку (наприклад, площа обертання лопатей турбіни);

t – час дії потоку.

Контролери температури та тиску Вітрові потоки в основному виникають через різницю температури та тиску між різними районами. Потужність вітрових потоків залежить від пори року та клімату. Швидкість, турбулентність і напрямок вітру значною мірою впливають на рельєф місцевості, який може включати гори, долини або рівнини.

Таким чином, параметри вітрового потоку, такі як швидкість, щільність, турбулентність і напрямок, є важливими для оцінки енергетичного потенціалу вітру, вибору місця для встановлення вітрових турбін і визначення їх ефективності.

Вітряву енергію можна розглядати як одну з форм прояву сонячної енергії, оскільки Сонце є основним джерелом, яке впливає на погоду на Землі. Вітер виникає через нерівномірне нагрівання поверхні Землі сонцем.

З часом вітер змінюється. У більшості регіонів сезонні зміни вітрових потоків значні. Крім того, взимку швидкість вітру зазвичай вища, ніж влітку. Зміни швидкості вітру зазвичай трапляються поблизу морів і великих озер. Оскільки сонце нагріває землю швидше, ніж воду, вранці вітер дме в напрямку узбережжя. Увечері вітер дме з узбережжя, оскільки земля остигає швидше, ніж вода. Метеостанції вимірюють швидкість вітру. На основі даних спостережень швидкостей вітру протягом багатьох років створюються спеціальні карти вітру.

2.2 Класифікація ВЕУ

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) класифікуються відповідно до кількох критеріїв, які стосуються їхньої конструкції, принципу роботи, потужності та сфери застосування [13] (рис. 2.1):

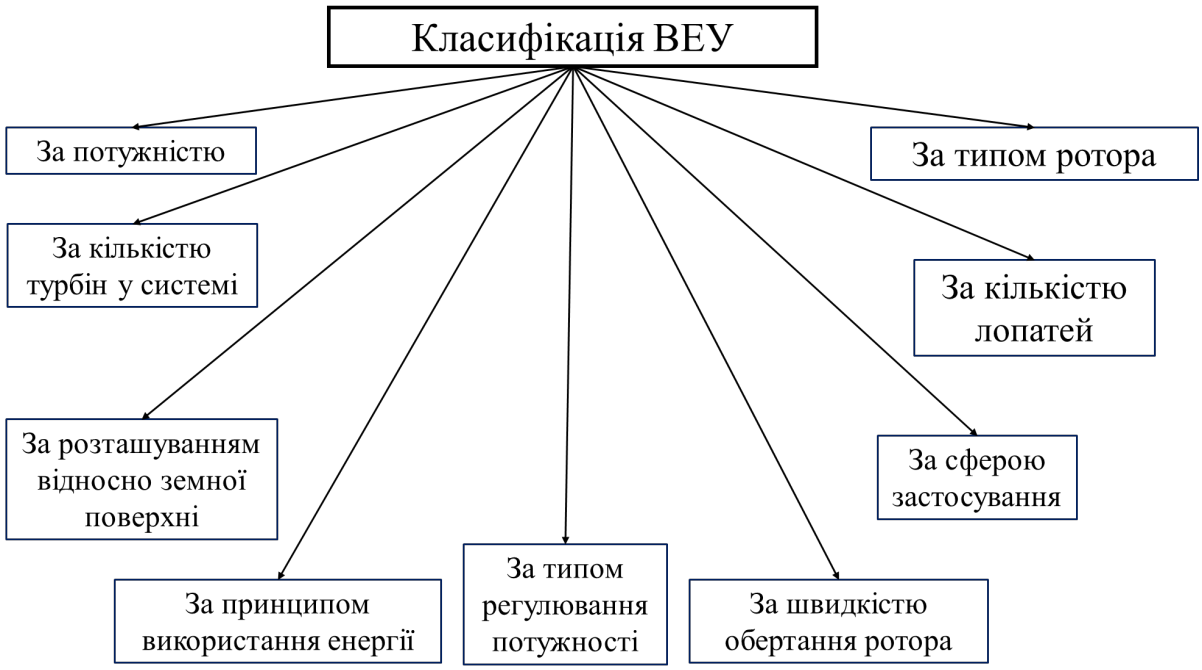


Рисунок 2.1 – Класифікація ВЕУ

ВЕУ поділяються на наземні і офшорні за їхнім розташуванням відносно землі (рис. 2.2). Незважаючи на те, що наземні ВЕУ прості в обслуговуванні, їхня стабільність вітрового потоку нижча. Розташування турбіни на рівнинах або гірських перевалах є хорошим варіантом.



Рисунок 2.2 – Наземні ВЕУ

Офшорні ВЕУ мають високу стабільність вітрового потоку, тому їх встановлюють у відкритому морі або на шельфі. Однак встановлення та обслуговування таких установок значно складніше (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Офшорні ВЕУ

ВЕУ поділяються на горизонтально-осьові та вертикально-осьові за типом ротора. Найпоширенішим типом є горизонтально-осьові ВЕУ (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines). У таких системах ротор обертається навколо горизонтальної осі. У сприятливих вітрових умовах вони мають високу ефективність (рис. 2.4).

ВЕУ вертикальної осі (VAWT) мають ротор, який обертається навколо вертикальної осі. Хоча вони не так ефективні, як горизонтальні, вони працюють у будь-якому напрямку вітру. Однак управління цими системами простіше [15, 16].

ВЕУ поділяються на великі, середні, малі та мікротурбіни за потужністю. Мікротурбіни використовуються в невеликих приватних будинках для освітлення та зарядки акумуляторів. Вони можуть виробляти до 1 кВт. Малі ВЕУ потужністю від 1 до 100 кВт підходять для окремих фермерських господарств, віддалених поселень і т. д. Малі промислові об’єкти використовують середні ВЕУ. Це від 100 кВт до 1 МВт. Коммерційні вітропарки з потужністю від 1 МВт і більше використовують великі ВЕУ.

ВЕУ поділяються на одно-, дво-, три- і багатолопатеві за кількістю лопатей. Через нестабільність і низьку ефективність однолопатеві часто не використовуються. Хоча вони прості, дволопатеві більш ефективні, ніж трилопатеві. Завдяки тому, що вони оптимально поєднують ефективність і стабільність, трилопатеві є найпоширенішими. Багатолопатеві системи використовують у низьковітряних умовах, особливо на фермах насосів.

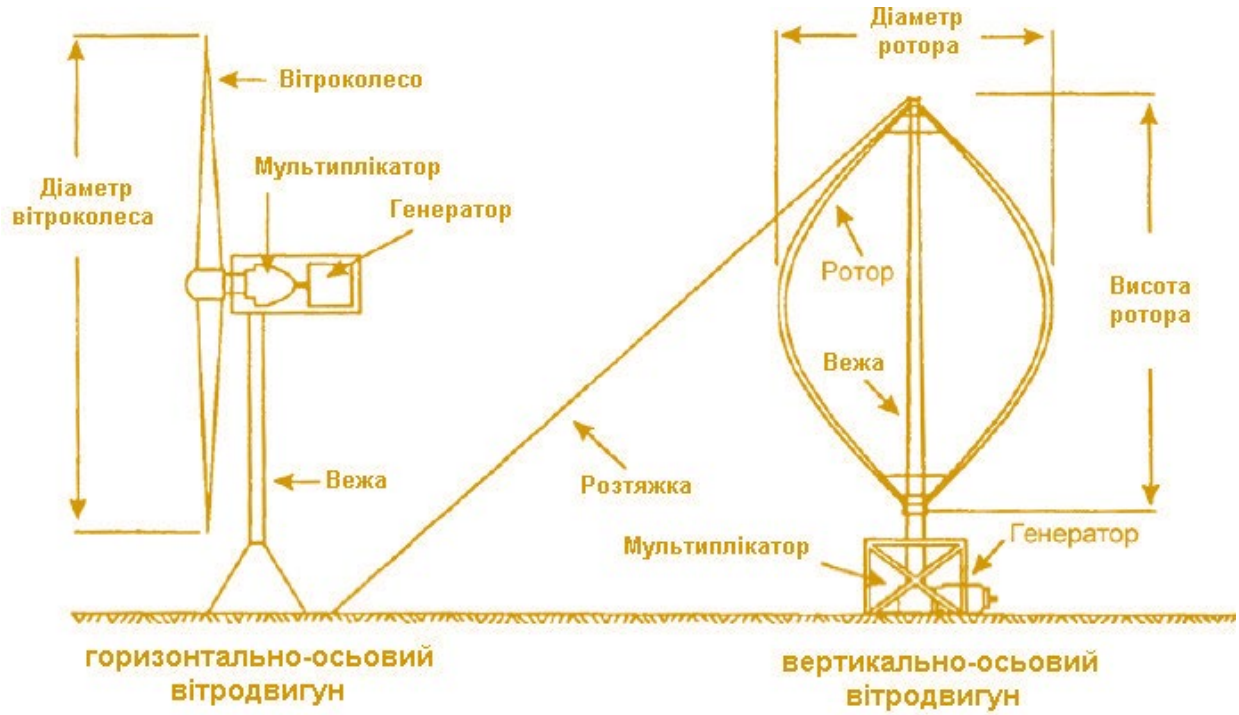


Рисунок 2.4 – Типи ротора ВЕУ

На основі принципу використання енергії ВЕУ поділяються на механічні (використовують енергію вітру безпосередньо для механічних робіт, таких як помпи та млини) і електричні (перетворюють енергію вітру на електроенергію).

Системи ВЕУ поділяються на вітропарки за кількістю турбін, які використовуються для масштабного виробництва енергії, і одиночні установки, які використовуються для особистих потреб. Існує два види: швидкохідні та низькохідні за швидкістю обертання ротора.

ВЕУ поділяються на промислові, локальні та мобільні залежно від того, де вони використовуються. Локальні генерують електроенергію для окремих

об’єктів, таких як будинки та підприємства; промислові ВЕУ генерують електроенергію за допомогою великих турбін і є легкими тимчасовими установками.

2.3 Аналіз силових елементів ВЕУ

Ефективність ВЕУ, адаптація до змін вітрового потоку та можливість інтеграції в електромережу залежать від типу використовуваного генератора та силового перетворювача. Найновіші системи використовують генератори з постійними магнітами або асинхронні двообмоткові генератори разом із повними перетворювачами потужності, щоб максимізувати ефективність і стабільність.

Для ВЕУ також використовують такі типи силових перетворювачів:

- змінної частоти:
- постійної частоти;
- частотні перетворювачі (VFD);
- повний перетворювач потужності.

Розглянемо їх коротко.

Силові перетворювачі змінної частоти застосовуються для генераторів, які працюють у широкому діапазоні швидкостей вітру і включають перетворювачі типу AC/DC/AC («змінний струм – постійний струм – змінний струм).

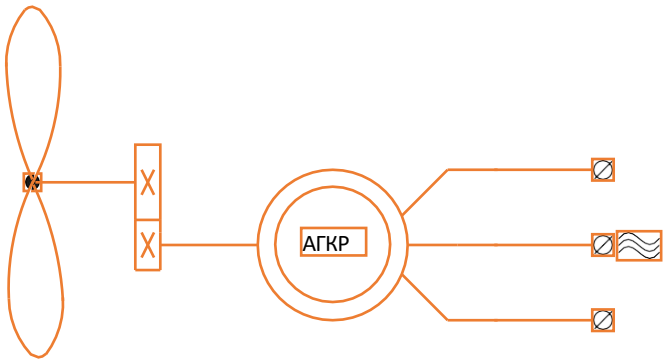
Силові перетворювачі постійної частоти забезпечують стабільну частоту енергії, яка подається в електромережу та володіють простотою, але обмежені у діапазоні робочих умов.

Силові частотні перетворювачі (VFD – Variable Frequency Drives) дозволяють працювати з генераторами змінної швидкості і мають стабільну вихідну напругу, гнучкість адаптації до мережі.

Повний перетворювач потужності забезпечує повне регулювання параметрів енергії на виході. Їх використовують з генераторами постійної частоти.

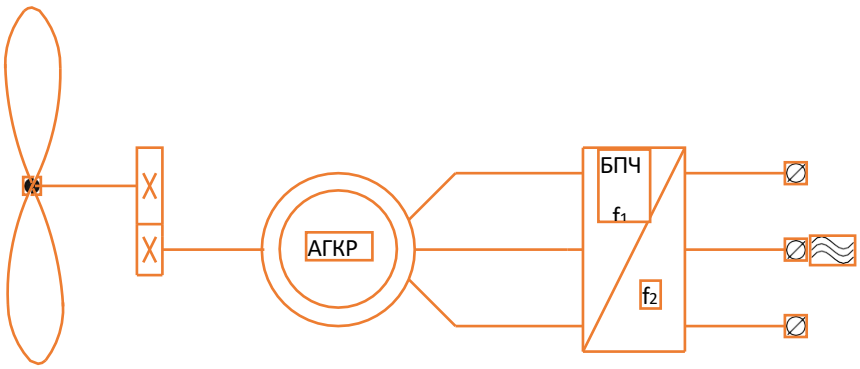
Наразі двигуни, які використовують ВЕУ, включають синхронні генератори, асинхронні генератори з короткозамкнутим ротором, генератори постійного струму та асинхронні генератори з фазним ротором. Асинхронні генератори із короткозамкнутим ротором є найпоширенішими [16].

Асинхронний генератор (АГ) підключений безпосередньо до мережі. Поки частота обертання машини перевищує синхронну частоту, машина віддає електроенергію в мережу з частотою, що рівна частоті мережі. Використання асинхронної машини з керуванням ротором дозволяє зменшити витрати на додаткові системи керування, оскільки асинхронна машина потребує менш точної підтримки частоти обертання ВК (рис. 2.5, а).



а

Якщо до схеми (рис. 2.5, б) додати перетворювач частоти, то отримаємо більш досконалу схему ВЕУ



б

Рисунок 2.5 – ВЕУ із асинхронним генератором:
а – з короткозамкненим ротором; б - з короткозамкненим ротором і перетворювачем частоти

Але використання асинхронної машини для ВЕУ має деякі недоліки. Такий пристрій потребує менше енергії, ніж синхронна машина при одному і тому ж вітровому режимі. Вона має менший коефіцієнт потужності через великі струми намагнічення, які приблизно пропорційні квадрату напруги. Це означає, що вона використовує реактивну потужність індуктивного характеру з мережі, що вимагає використання компенсуючих пристроїв. Зменшення ефективності системи залежить від наявності мультиплікатора.

Синхронні генератори (СГ) також використовують для ВЕУ. Зважаючи на те, що схема підключення ВЕУ з безпосереднім підключенням синхронних генераторів до мережі схожа на схему АГ з корокозамкненим ротором, показану на рисунку 2.5 а, немає сенсу наводити цю схему окремо [17, 18].

Потужність енергосистеми набагато більша, ніж ВЕУ, тому генератор буде в синхронізмі з ВД в широкому діапазоні зміни потужності. Синхронні генератори можуть створювати та контролювати як активну, так і реактивну потужність, а також регулювати напругу статора. Недолік синхронної машини, яка працює безпосередньо на енергосистемі, полягає в тому, що при певних вітрових умовах вона може працювати в режимі двигуна і споживати енергію з енергосистеми; машина може рухатися паралельно з іншими агрегатами; і дуже ймовірно, що машина вийде з синхронізму під час сильних поривів вітру. Крім того, процес підключення машини до енергосистеми є складним.

Ці недоліки значно усунені за допомогою використання безпосереднього перетворювача частоти між енергетичною системою та синхронним генератором. Тим не менш, така система має обмеження щодо керування ВЕУ. Ці обмеження включають швидкість обертання та момент.

Недоліком також є використання мультиплікатора, який узгоджує частоту обертання колеса з генератором. Підключення синхронного генератора до мережі за допомогою безпосереднього перетворювача частоти є схемою, подібною до зображеної на рисунку 2.5 б, тому його не наводиться окремо.

ВЕУ, який використовує синхронного генератора та перетворювача частоти з кількох ланок, має значно кращі можливості для керування. Одним із варіантів структури є ВЕУ на основі синхронних генераторів із додаванням перетворювачів. Синхронный генератор має трифазну обмотку, а ротор може мати обмотку збудження або постійні магніти. Рисунок 2.6 показує структуру типового ВЕУ з синхронним генератором з обмоткою збудження. Такий пристрій підключається до мережі за допомогою силового перетворювача частоти. Використання сучасних перетворювачів частоти із високим ККД робить цю систему ефективною, оскільки її коефіцієнт потужності можна контролювати.

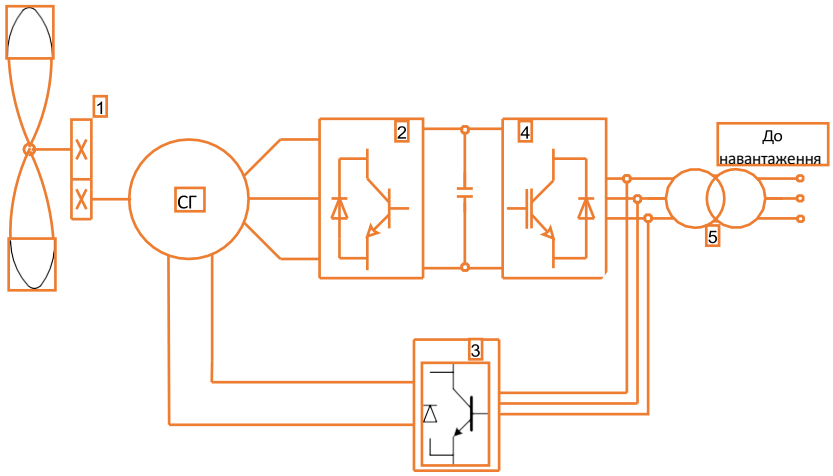


Рисунок 2.6 – Конфігурація вітрової енергетичної установки із використанням синхронного генератора:
1 – редуктор; 2, 3 – випрямлячі; 4 – інвертор; 5 – трансформатор

На зображенні вітрове колесо (ВК) підключено до варіатора або редуктора, а двома випрямлячами синхронний генератор підключено до мережі. Цей тип випрямлячів базується на широтно-імпульсній модуляції.

Одне з них підключено до обмотки статора, яка випрямляє напругу для інвертора. Після цього напругу передають у мережу через трансформатор, який також має можливість змінювати момент генератора. Інший керує випрямлячем, який керує обмоткою збудження синхронного генератора. Тим не менш, така система потребує використання редуктора, який знижує ефективність системи, а також синхронного генератора, який може мати значні розміри. Таким чином, система неефективна.

Рисунок 2.7 демонструє підключення ВЕУ до мережі за допомогою синхронного генератора на постійних магнітах. Перевагою цього варіанту є те, що він не містить контактних кілець і простий у конструкції. Обмотку статора генератора підключається до мережі через діодний випрямляч 2, ШІМ-перетворювач 3 і інвертор 4. ШІМ-перетворювач регулює момент обертання вітротурбіни, щоб максимізувати потужність конденсатора, тоді як діодний випрямляч випрямляє змінну напругу, зняту зі статора генератора. Інвертор не тільки регулює коефіцієнт потужності, але й перетворює постійну напругу у змінну та передає її в мережу [17].

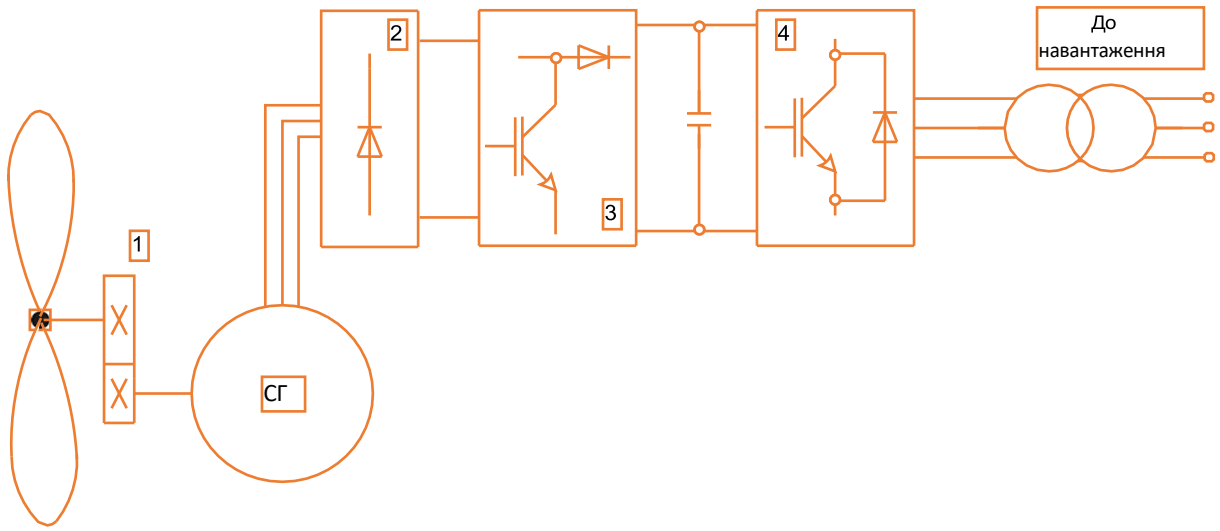


Рисунок 2.7 – Структурна схема ВЕУ із використанням синхронного генератора на постійних магнітах

Недолік цієї системи, як і в попередній системі, полягає в тому, що для підвищення частоти обертання вала, необхідного для синхронного генератора,

необхідний редуктор. Редуктор знижує ККД ВЕУ. Постійні магніти не тільки дорогі, але й можуть втрачати свої магнітні властивості в синхронному генераторі. Цей генератор може працювати в місцях з невеликою потужністю завдяки своїм великим масогабаритним характеристикам. Немає можливості прямо контролювати напругу виходу.

Крім того, використовуються асинхронні генератори, які забезпечують подвійне джерело живлення. Асинхронні двигуни з фазним ротором можуть бути використані для ВЕУ через певні переваги. Основною перевагою асинхронного генератора з фазним ротором є те, що він може забезпечувати постійну частоту напруги на виході, незважаючи на зміну частоти обертання ротора в певних межах. Асинхронізований синхронный генератор (АСГ) і надсинхронний вентильний каскад (НВК) є двома прикладами схем, які використовують генератор подвійного живлення.

Рисунок 2.8 показує схему асинхронізованого синхронного генератора, який використовується в обмотці ротора безпосереднього перетворювача частоти (БПЧ). Крім того, обмотка статора підключена безпосередньо до енергетичної системи [15 - 17].

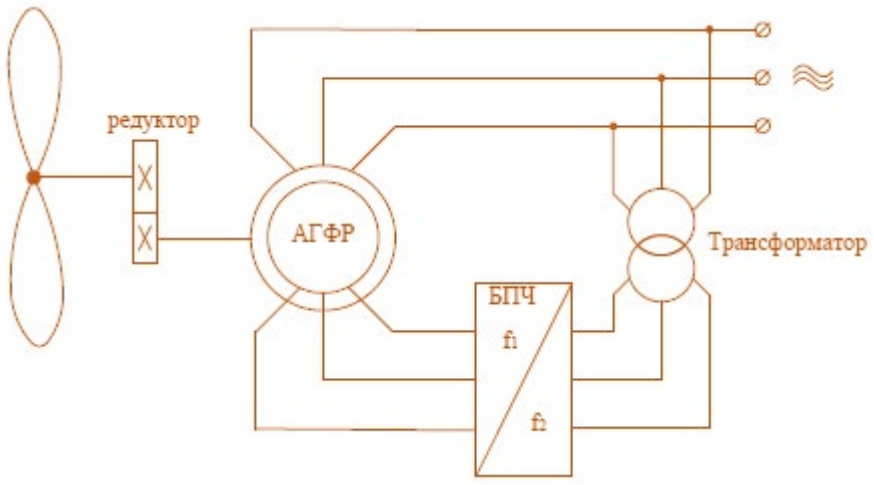


Рисунок 2.8 – Схема ВЕУ з АСГ із живленням ротора через перетворювач частоти

ВЕУ, які базуються на асинхронізованому синхронному генераторі, можуть працювати як у надсинхронному, так і в підсинхронному режимах, але їхні діаметри повинні бути достатньо великими, щоб забезпечити достатню потужність. Таким чином, використання асинхронних двигунів з фазним ротором є обмеженим. Крім того, серійні машини не повинні працювати в режимах, віддалених від номінального.

Рисунок 2.9 показує спрощену схему ВЕУ з використанням надсинхронного вентильного каскаду. Трифазний випрямляч має вхід трифазного випрямляча, а обмотка статора підключена до енергетичної системи. Випрямляч підключений до ІВМ. У цьому випадку як статор, так і ротор отримують потужність. Це робить машину більш ефективною та розширює можливості керування [15 - 17].

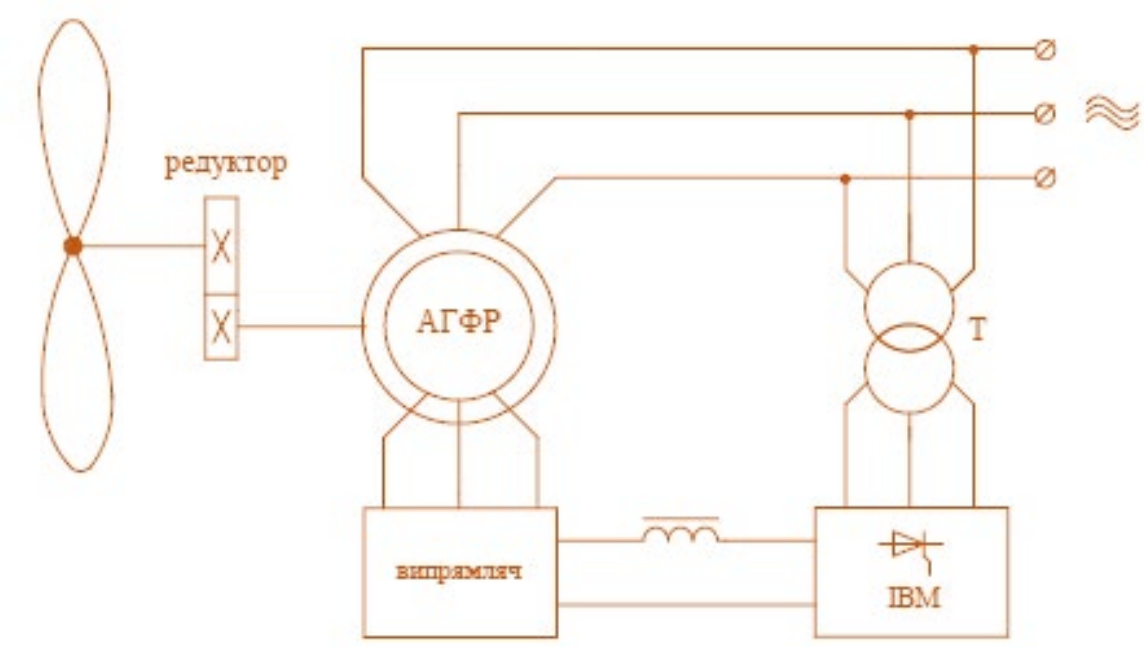


Рисунок 2.9 – Схема ВЕУ із використанням синхронного вентильного каскаду

Крім недоліків асинхронізованого синхронного генератора, ця система має ще один недолік: генерація активної потужності може відбуватися лише при надсинхронній швидкості обертання. Оскільки випрямляч в колі ротора може передавати активну потужність лише від роторної обмотки на

перетворювач частоти, а не навпаки, підсинхронний режим неможливий. Це означає, що або використання мультиплікатора, або висока швидкість обертання ВК знизить загальний ККД системи.

2.3 Конструктивні особливості та принцип дії вітрових генераторів

Основним компонентом вітроенергетичної установки (ВЕУ) є вітровий генератор, який перетворює кінетичну енергію вітру в електричну енергію. Вітроенергетичні установки складаються з таких компонентів: вежа (щогла), ротор, гондола (генераторний корпус), редуктор, генератор, система контролю та захисту та силові перетворювачі.

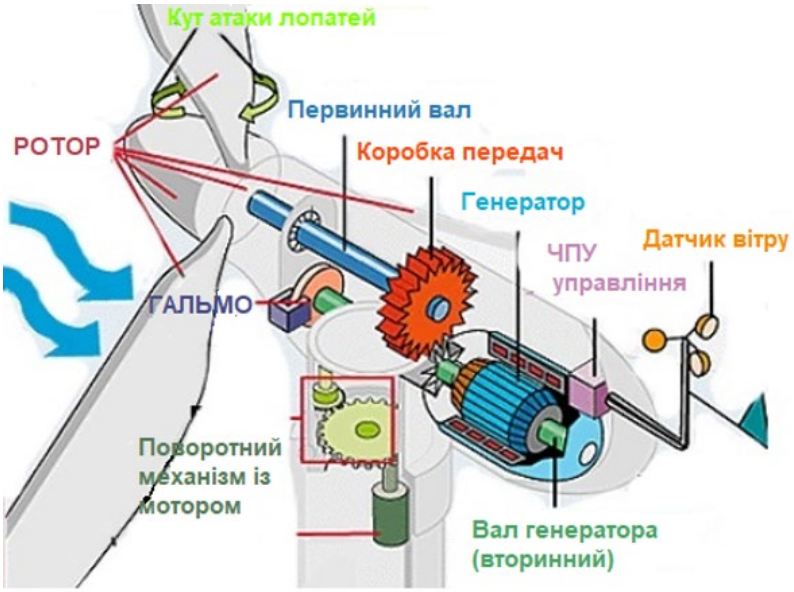
Вежа або щогла піднімає вітровий генератор на певну висоту, де швидкість і стабільність вітру вищі. Вежі, також відомі як щогли, виготовляються зі сталі або залізобетону. Залежно від потужності генератора, висота веж зазвичай коливається від тридцяти до сто п’ятдесяти метрів. Ротор складається з втулки, до якої вони кріпляться, і лопатей. Лопаті передають механічну енергію на вал після того, як вони уловлюють енергію вітру. Для лопатей можна використовувати скловолокно, вуглецеве волокно або композитні матеріали.

Гондола, також відома як корпус генератора, складається з основних робочих вузлів генератора, таких як головний вал, редуктор, генератор, система охолодження та система контролю. Система орієнтації гондоли кріпиться до вежі і дозволяє їй обертатися в напрямку вітру.

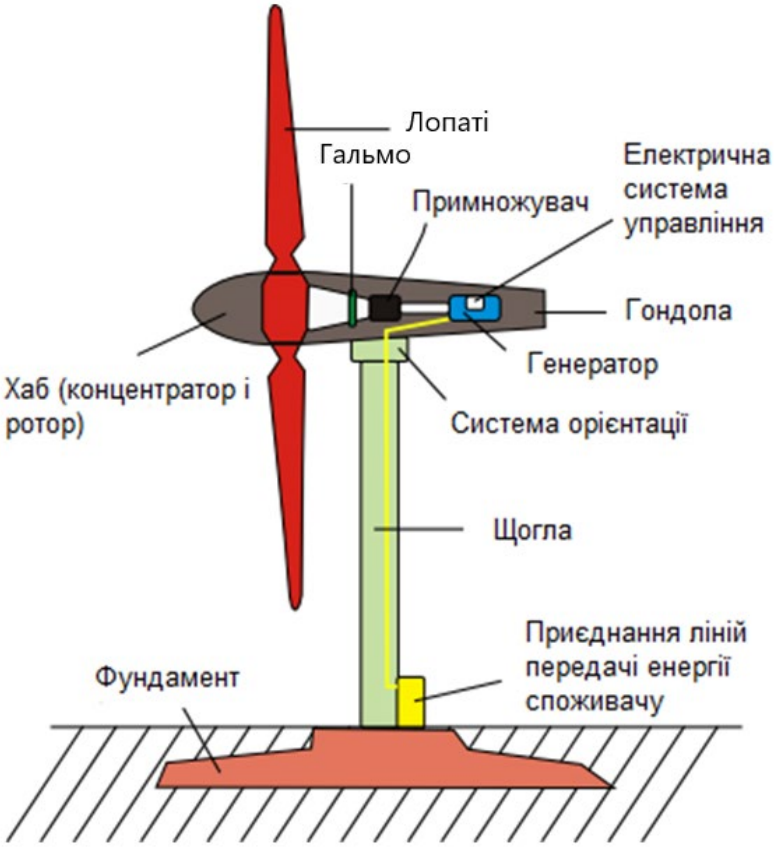
Редуктор підвищує швидкість обертання валу, що надходить від ротора, до рівня, який потрібен генератору. Наприклад, безредукторні генератори не мають редуктора, що зменшує втрати енергії. Система контролю та захисту відстежує швидкість вітру, напрямок генератора та роботу. Для захисту обладнання дана система має автоматичну систему відключення при надмірно сильному вітрі.

Силові перетворювачі отримують електричну енергію з генератора та перетворюють її на стабільну частоту та напругу, які можна передати в

електромережу. Спрощена конструкція вітрогенератора показано на рисунку 2.10 [17].



а



б

Рисунок 2.9 – Конструктивні елементи горизонтального вітрогенератора: а – конструкція головної частини вітрогенератора; б – загальна конструкція вітрогенератора

Вітрові генератори працюють за принципом перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію, а потім в електричну енергію. Силою вітру лопаті ротора обертаються. Форми та швидкості вітру визначають обертання лопатей. Редуктор отримує механічну енергію від обертання лопатей через головний вал. У системах без редукторів вал безпосередньо з'єднаний із генератором. Генератори (синхронні або асинхронні) генерують електричну енергію з механічної енергії обертання. Енергія виробляється в генераторах із постійними магнітами шляхом обертання ротора в магнітному полі. Силові перетворювачі регулюють параметри електричного струму, включаючи напругу та частоту, щоб переконатися, що споживана енергія відповідає стандартам електромережі. Електроенергія, яка виробляється, надсилається в локальну або загальну електромережу для подальшого використання. Щоб запобігти несправності під високим тиском повітря, установка має спеціальну систему гальмування. Якщо швидкість вітру перевищує 50 км/год, гальма автоматично зупиняють обертання ротора. Коли швидкість повітря досягає 80 км/год, гальмівна система повністю зупиняє лопаті. Усі частини турбіни розроблені таким чином, щоб максимізувати використання повітря.

Сьогодні більшість ВЕУ використовують безредукторні генератори. Вони більш надійні та менші втрати енергії на передачу через відсутність механічного зносу редуктора. Через складність конструкції генератора такі системи мають вищу вартість.

Кінетична енергія вітру передається обертанням лопатей, механічною енергією валу, генератором, електричною енергією та силовим перетворювачем до електромережі.

Типова система енергозабезпечення на базі вітрогенератора включає такі елементи:

- вітроелектрична установка (вітрогенератор, ВЕУ);
- акумуляторна батарея (АКБ) – це буфер, який узгоджує графіки вироблення та споживання енергії;

- контролер заряду АКБ – захищає АКБ від перезаряду, обмежуючи зарядний струм та напругу;
- інвертор – перетворює постійну напругу на змінну ~220В;
- зарядний пристрій – за потреби заряджає АКБ від зовнішньої мережі ~220В;
- мережева автоматика – стежить за станом мережі і за заданим алгоритмом підключає навантаження до мережі або до інвертора.

3 УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ ВЕУ

3.1 Напрямки підвищення ефективності ВЕУ

Підвищення продуктивності та економічної доцільності відновлюваної енергетики вимагає покращення ефективності вітроенергетичних установок (ВЕУ). Для оптимізації роботи ВЕУ потрібні рішення як технічні, так і управлінські.

Підвищення ефективності вітроенергетичних установок може бути досягнуто шляхом оптимізації аеродинамічних характеристик лопатей; впровадження інтелектуальних систем керування; використання генераторів нового покоління; оптимізація розташування ВЕУ; інтеграція систем накопичення енергії; покращення технічного обслуговування; зменшення втрат у силових перетворювачах; та адаптація до змінних вітрових умов (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Шляхи підвищення ефективності ВЕУ

Використання сучасних матеріалів і удосконалення профілю лопатей можуть бути використані для підвищення ефективності. Серед можливих матеріалів – це полімери, скловолокно та вуглецеве волокно, які надають легкість, стійкість і міцність.

Удосконалення аеродинамічного профілю лопатей дозволяє максимально використовувати енергію вітру. Удосконалення аеродинамічного профілю лопатей дозволяє максимально використовувати енергію вітру. Можна зменшити турбулентні втрати, додавши стабілізатори на кінці лопатей. Щоб використовувати інтелектуальні системи керування SCADA дозволяють спостерігати та аналізувати дані в режимі реального часу для виявлення неефективностей і оптимізувати режим роботи ВЕУ відповідно до вітрових умов.

Автоматичне регулювання кута нахилу лопатей, дозволяє регулювати роботу турбіни відповідно до швидкості та напрямку вітру, зберігаючи при цьому стабільну вихідну потужність. Для максимізації ефективності система орієнтації гондоли автоматично орієнтує ротор у напрямку вітру.

Безредукторні генератори мають кращу ефективність у низьковітряних умовах і знижують механічні втрати. Двообмоткові асинхронні генератори можуть працювати зі швидкостями вітру в широкому діапазоні. Завдяки відсутності втрат на збудження генератори з постійними магнітами демонструють високий ККД.

Мікрооптимізація в вітропарку включає визначення найкращої відстані між турбінами, щоб зменшити ефект «затінення», коли відбувається вплив турбулентності від сусідніх ВЕУ. Максимізація ефективності розташування ВЕУ, наприклад, якщо ВЕУ знаходяться в районах, де річна середня швидкість вітру становить високу (5…12 м/с). Для вибору місць з найменшими перешкодами (гори, будівлі) необхідно використовувати ретельний географічний аналіз.

Важливим елементом системи може бути інтеграція систем накопичення енергії. Використання накопичувачів покращує стабільність

енергопостачання та дозволяє акумулювати та збалансувати виробництво енергії під час пікової та мінімальної вітрової активності. Для безперебійної роботи гібридні системи поєднують ВЕУ з сонячними електростанціями або іншими джерелами енергії.

Покращення технічного обслуговування передбачає постійне спостереження за станом обладнання. Наприклад, для швидкого виявлення несправностей доцільно використовувати датчики вібрації, температури та напруги. Предиктивне обслуговування дозволяє прогнозувати технічний стан компонентів ВЕУ за допомогою аналізу даних за допомогою штучного інтелекту.

Сучасні перетворювачі енергії на основі IGBT або SiC-транзисторів можуть підвищити ефективність і зменшити втрати. Узгодження вихідної частоти з електромережею за допомогою оптимізації режимів роботи. Пристосування до змінних вітрових умов Змінна швидкість обертання ротора покращує енерговіддачу в умовах нестабільного вітрового потоку. Вплив нерівномірного вітрового потоку на роботу турбіни зменшується за допомогою систем контролю турбулентності.

Отже, для підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок потрібен комплексний підхід, який включає використання нових матеріалів і технологій, оптимізацію конструкції, застосування сучасних систем керування та інтеграцію накопичувачів енергії. Постійний розвиток у цих напрямках дозволяє краще використовувати енергію вітру, зменшити витрати на обслуговування та підвищити продуктивність ВЕУ.

3.2 Оцінка енергопотенціалу вітрової енергії в Україні

Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні є вітрова енергетика. Нація має значний енергетичний потенціал для використання вітрової енергії завдяки

сприятливому природно-кліматичному середовищу та стратегічному географічному розташуванню.

Загальний потенціал для використання вітрової енергії в Україні Оцінка теоретичного потенціалу становить від 3000 до 5000 мегават-години встановленої потужності. З урахуванням обмежень інфраструктури, рельєфу та густоти населення технічний потенціал становить близько 90 ТВт/год/рік. Потенціал економічно доцільної генерації становить до 30 ТВт/год на рік, що може забезпечити 10…12 % загального енергоспоживання країни (рис. 3.2) [7].

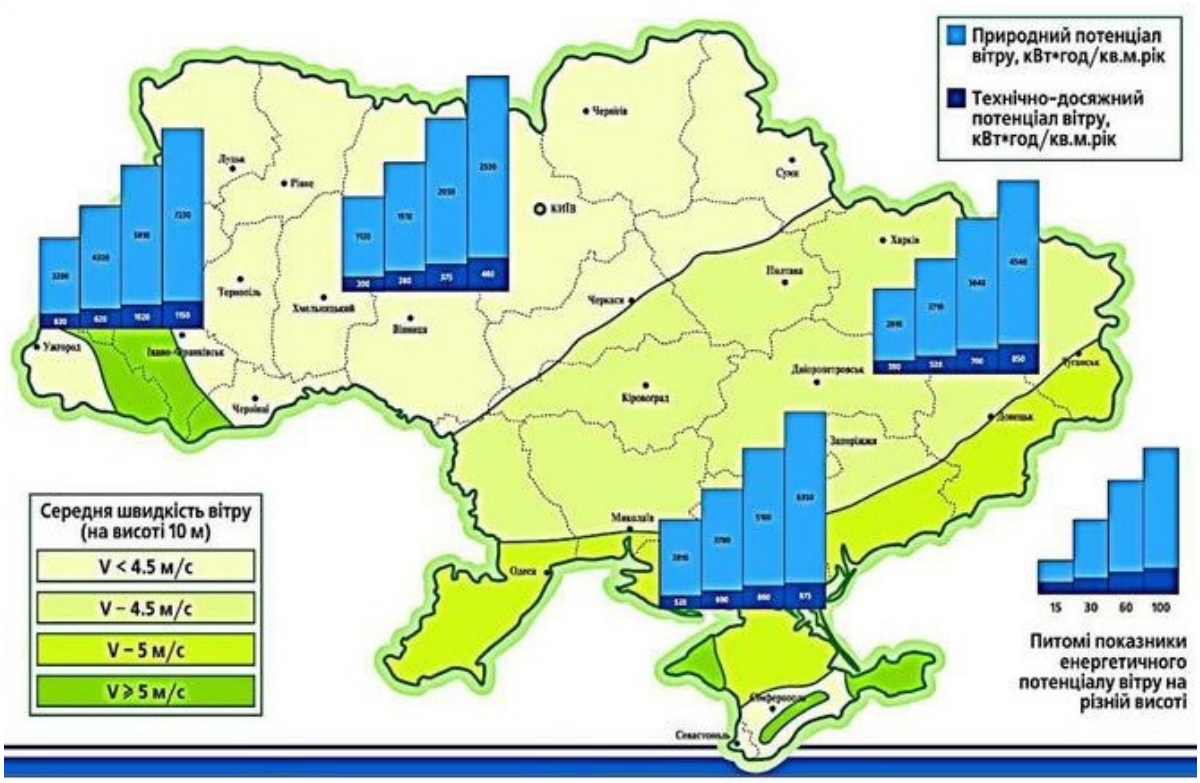


Рисунок 3.2 – Питомий енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

Регіони з найвищим потенціалом. Основні регіони, де швидкість вітру є оптимальною для розвитку вітрових електростанцій (ВЕС), включають [6, 7]:

1) Південні регіони:

- Одеська;
- Миколаївська;
- Херсонська області.

Середня швидкість вітру складає 6…8 м/с на висоті 100 м.

2) Приазов'я та Донбас:

- Запорізька;
- Донецька області.

Також, чималий потенціал, завдяки відкритим ділянкам і сталим вітровим потокам мають такі регіони:

- Івано-Франківська;
- Закарпатська;
- Львівська області.

Середня швидкість вітру складає 5…7 м/с у гірських районах.

Кримський півострів. До 2014 року був одним із найбільш перспективних районів через стабільні вітрові умови. Однак після захоплення Криму росією, країною-терористом, це питання було відкладено до часу, коли Крим буде звільнений від окупації росією.

На 2023 рік в Україні буде встановлено близько 1700 МВт вітрових електростанцій. Великі електростанції, які працюють на півдні країни, є основними проектами. Серед них є ВЕС Приморська (Запорізька область) з потужністю 200 МВт і ВЕС очаківська (Миколаївська область) з потужністю 100 МВт. Велика кількість вітрових установок була побудована за допомогою «зеленого тарифу», який стимулює інвесторів до розвитку галузі.

Перспективи для прогресу. Державні програми підтримки ВДЕ приваблюють міжнародних інвесторів. Для модернізації енергетичної інфраструктури необхідно побудувати електричні мережі, щоб інтегрувати енергію з вітрових електростанцій. Використання сучасних технологій, як-от створення офшорних вітрових станцій у Чорному та Азовському морях.

Розвиток локальної генерації також є перспективним, зокрема створення малих вітрових електростанцій для приватних домогосподарств і компаній. Розподіл енергетичного потенціалу вітрової енергії України наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Питомий енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

№ району	Середньорічна швидкість вітру, $V_{ср}$, м/с	Висота, м	Природний потенціал вітру, кВт.год/м^2 рік	Технічно-досяжний потенціал вітру, кВт.год/м^2 рік
1	< 4,25	15	1120	200
		30	1510	280
		60	2030	375
		100	2530	460
2	4,5	15	2010	390
		30	2710	520
		60	3640	700
		100	4540	850
3	5,0	15	2810	520
		30	3790	690
		60	5100	860
		100	6350	975
4	5,5	15	3200	620
		30	4320	830
		60	5810	1020
		100	7230	1150

У той же час, на жаль, на даний час рашисти вже окуповували багато потенційних територій для будівництва ВЕС. Крім того, розповсюдження вітрової енергетики значно обмежено високими витратами на будівництво та технічне обслуговування вітрових установок.

Таким чином, Україна має значний потенціал для використання вітрової енергії, особливо в південних і карпатських областях. Можна значно збільшити частку вітрової енергетики в національному енергобалансі за допомогою розвитку інфраструктури, впровадження сучасних технологій і інвестицій. Це зміцнить національну енергетичну незалежність і зменшить екологічне навантаження.

3.3 Удосконалення системи керування ВЕУ

Для систем, які використовують відновлювальні джерела енергії, особливо вітроенергетичні установки, важливо, щоб вони вирівнювали рівні та різні типи напруг між собою. Коли амплітуда змінної напруги та частота змінюються, це особливо важливо для установок, які працюють із змінними частотами обертання. У більшості випадків такі установки є найбільш ефективними. Це відрізняє ці алгоритми від інших алгоритмів, таких як використання редукторів або перемикання обмоток. Це досягається за допомогою різних технічних інструментів, які можна візуально представити у вигляді структурної схеми. Структурна схема дозволяє візуально показати взаємозв'язок і вирівнювання пристроїв, вибрати необхідні пристрої та визначити, які пристрої система управління повинна контролювати.

Виробництво вітроенергетики використовує синхронну машину, яка використовує постійні магніти як генератори. Використання магнітом'яких матеріалів для створення синхронних генераторів дозволяє підвищити ККД. Ще однією перевагою є зменшення реактивного моменту генератора, що зменшує пульсації реактивного моменту, що зменшує шум і вібрації.

Автономні системи використовують накопичувачі електроенергії для використання відновлювальних джерел енергії. Це дозволяє передавати енергію споживачу навіть у випадках відсутності генерації. Однак під час пікової генерації енергія накопичується. Зазвичай накопичувальні пристрої складаються з акумуляторів.

Для використання в вітроенергоустановках генератор має такі характеристики: нестаціонарність сили вітру та швидкості за досить короткий проміжок часу; значні динамічні моменти генератора та вітротурбіни; відсутність механічної ланки, яка може демпфувати осьові зусилля на валу; постійно діючі перехідні процеси та пов'язані з ними струми та електродинамічні сили (рис. 3.3 – 3.5) [14, 15 - 17].

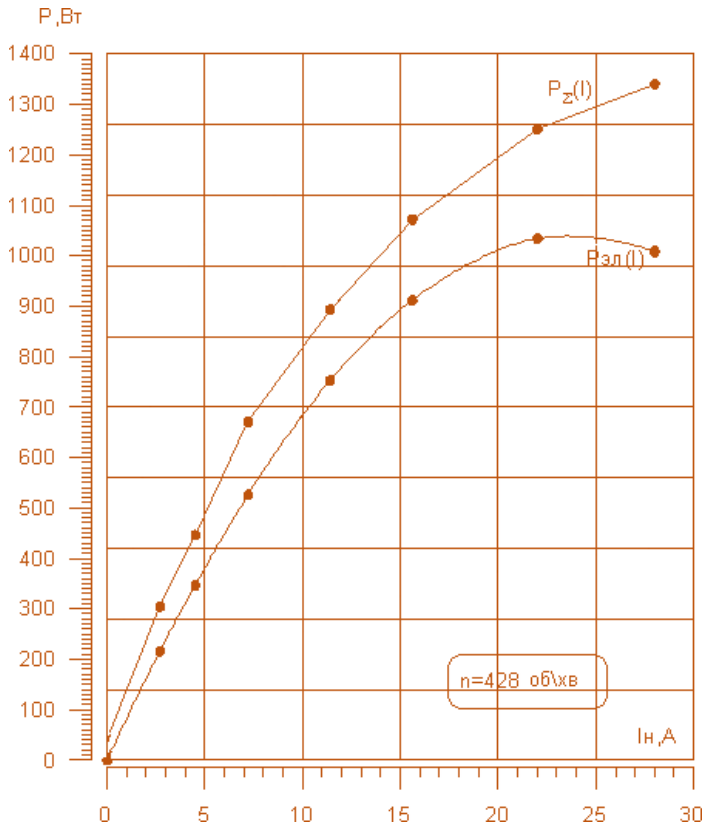


Рисунок 3.3 – Характеристика потужності генератора

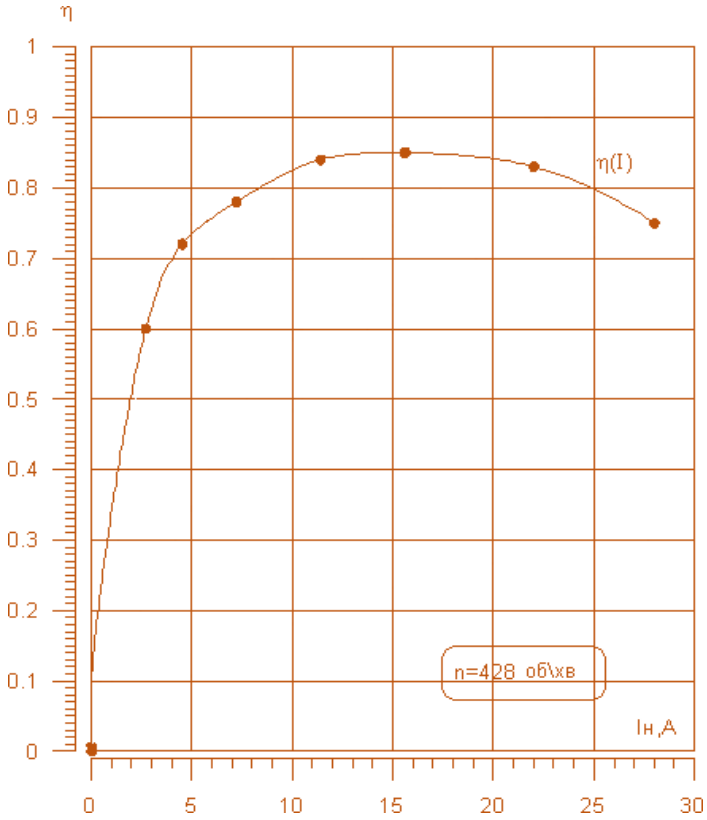


Рисунок 3.4 – Характеристика зміни ККД генератора залежно від навантаження

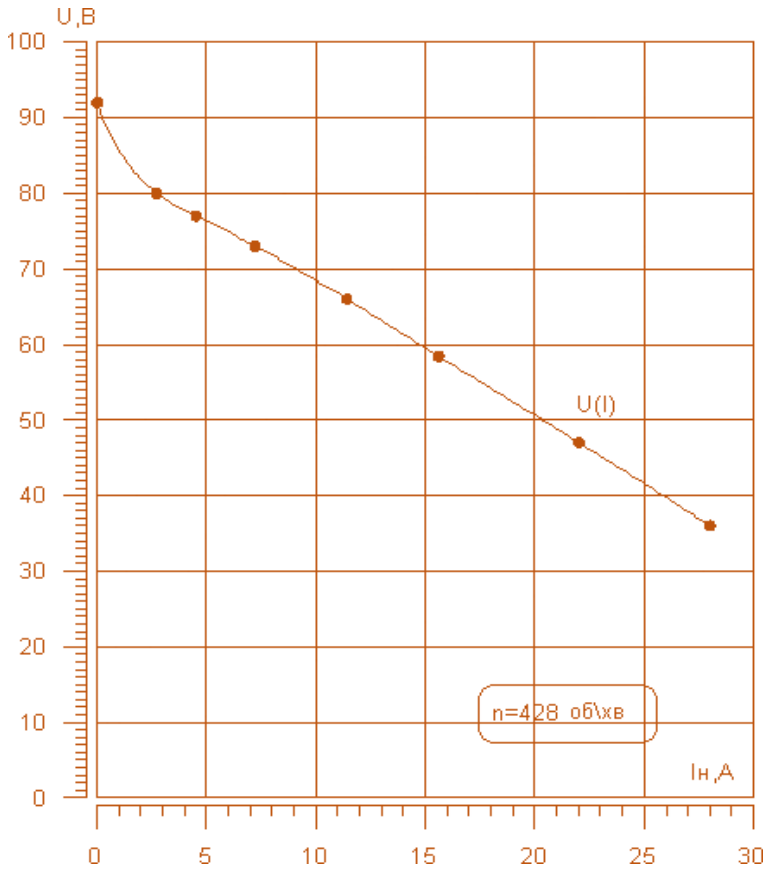


Рисунок 3.5 – Зовнішні характеристики генератора

Вітроенергетична характеристика вітроколеса наведена на рисунку 3.6.

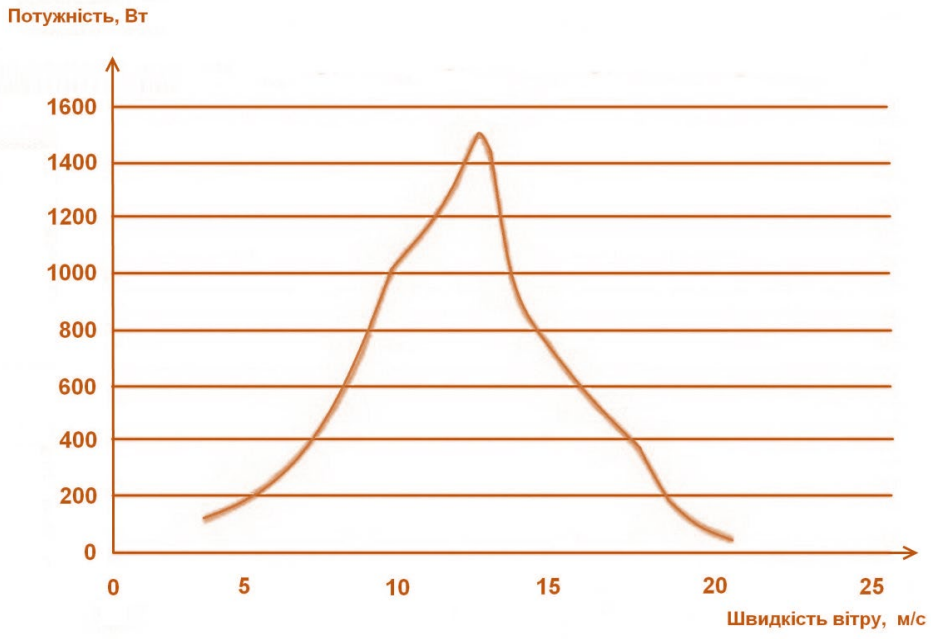


Рисунок 3.6 – Вітроенергетична характеристика вітроколеса

Структурна схема електропостачання споживача від вітрогенератора показана на рисунку 3.7 [18].

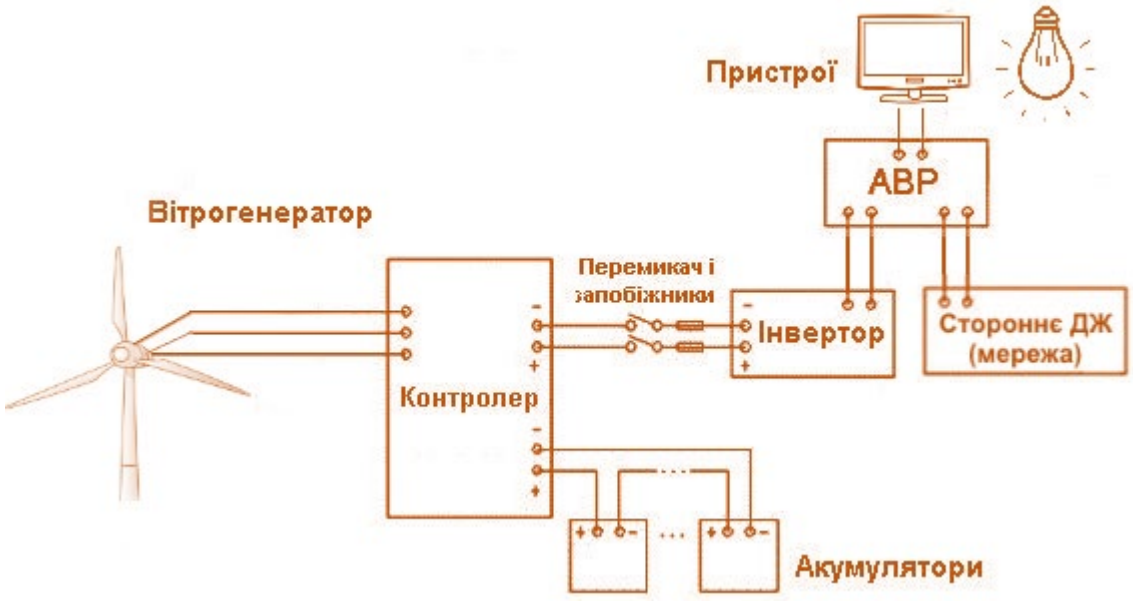


Рисунок 3.7 – Структурна схема системи керування вітрової енергоустановки

На основі структурної схеми була розроблена функціональна схема системи керування ВЕУ (рис. 3.8).

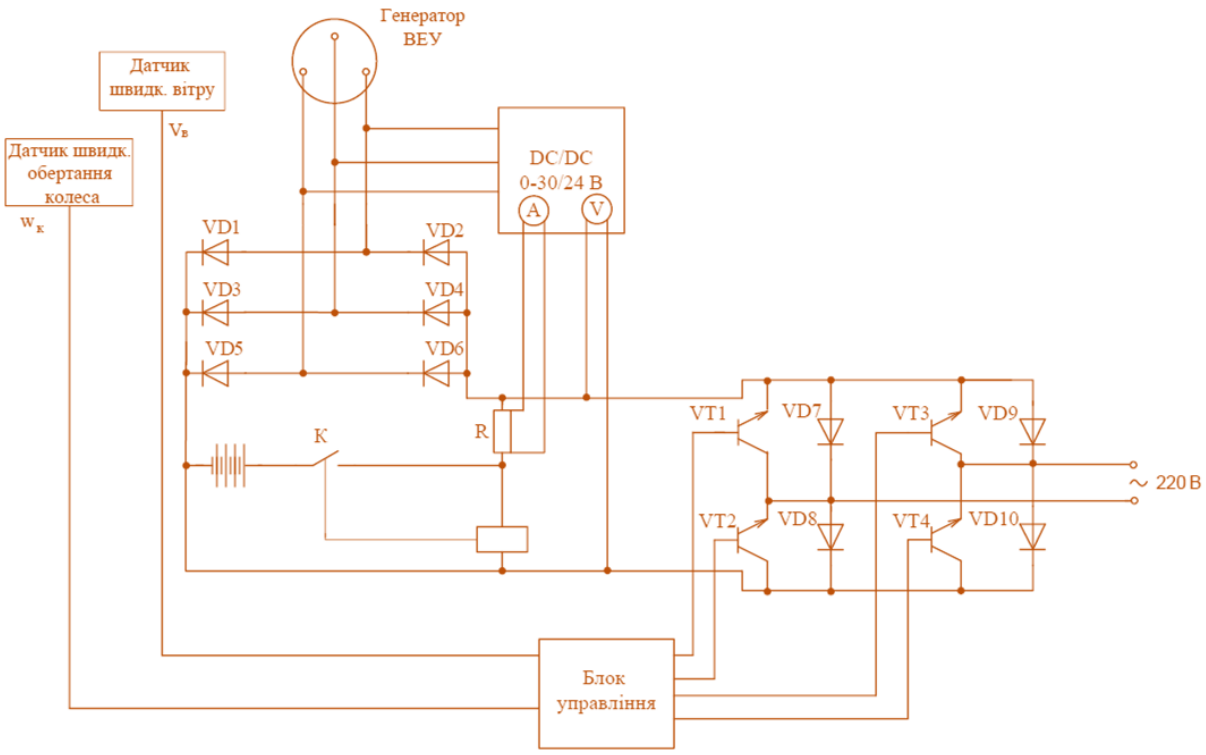


Рисунок 3.8 – Функціональна схема керування електроприводом ВЕУ

Автоматичний регулятор напруги (АВР) перемикає систему з основного джерела на резервне, якщо в акумуляторних батареях не вистачає енергії. Така схема гарантує, що споживач отримує достатню кількість електроенергії.

Якщо немає електроенергії, бензогенератор може служити резервним джерелом живлення, або, якщо є централізоване електропостачання, сам вітровий електротехнічний комплекс може служити резервним джерелом живлення. Швидкохідність визначає коефіцієнт потужності ВЕУ.

При роботі колеса ВЕУ оптимізація роботи в точці відбору максимальної потужності має вирішальне значення. Коефіцієнт потужності вітрового колеса зменшується зі збільшенням швидкості обертання, досягаючи максимального відбору потужності, як показано на діаграмах.

Система управління ВЕУ з окремим навантаженням. У цьому випадку надзвичайно важливо контролювати струм заряду акумулятора, щоб забезпечити ідеальну швидкість обертання вітрового колеса та максимальну потужність, яку можна використовувати. Момент навантаження вітрового колеса зміниться, коли змінюється струм заряду акумулятора. Швидкість вітру буде використана для оптимізації швидкості обертання. Таким чином можна автоматично утримувати кутову швидкість обертання вітроколеса, змінюючи момент навантаження ВЕУ та стабілізуючи швидкість за рахунок збільшення струму заряду та струму навантаження (рис. 3.9) [20].

Система дозволяє змінювати момент обертання вітроенергетичної установки, оптимізуючи її роботу. Іншими словами, система намагається досягти оптимальної точки MPPT (Maximum Power Point Tracking). Це означає, що вона намагається досягти максимальної можливої електричної потужності на виході схеми за допомогою змінної швидкості обертання вітроколеса.

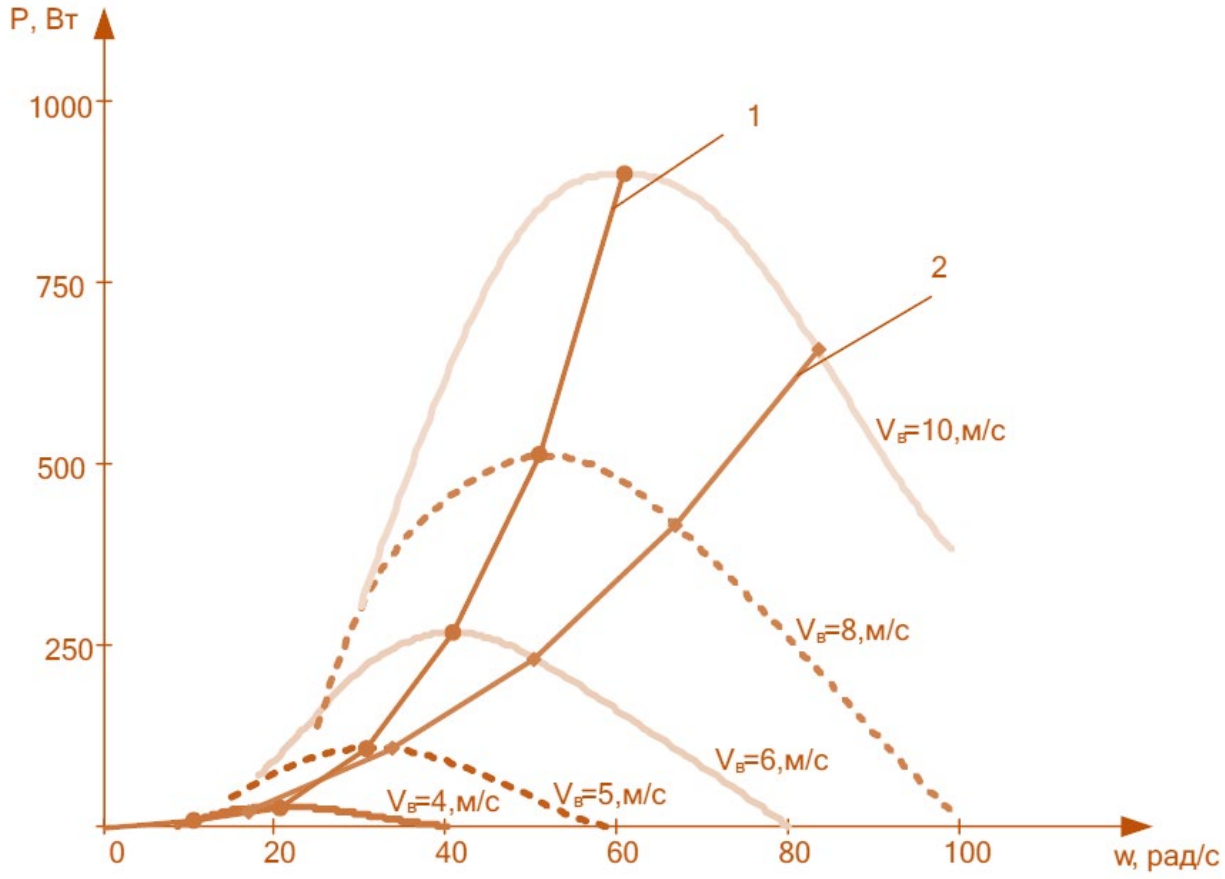


Рисунок 3.9 – Криві потужностей вітрової турбіни при її роботі із регулюванням (1) та без регулювання (2)

ВЕУ не може повністю реалізувати свій потенціал без регулювання (рис. 3.9). На високих швидкостях вітру турбіна недовантажена, тоді як на низьких швидкостях вітру вона переповнена. Іншими словами, VEU працює на кутовій швидкості колеса, яка відрізняється від ідеальної, і рухається в ту чи іншу сторону.

3.4 Оцінка техніко-економічного ефекту від впровадження ВЕУ

Техніко-економічний розрахунок є важливим етапом оцінки доцільності створення установки вітроенергетики. Вони включають розрахунок вартості будівництва, витрат на експлуатацію, кількості виробленої енергії та терміну окупності.

Для розрахунку приймаємо такі початкові умови:

- потужність ВЕУ – 2000 кВт;
- середня швидкість вітру – 7 м/с;
- коефіцієнт потужності $C_р$ – 0,35;
- щільність повітря ρ – 1,225 кг/м³.
- кількість годин роботи на рік (середньорічна продуктивність) – 3000 год;
- вартість будівництва 1 кВт встановленої потужності – 1200 $/кВт;
- експлуатаційні витрати на рік – 2 % від капітальних витрат;
- тариф на електроенергію (зелений тариф) – поточний.

Розрахунок річного виробництва електроенергії.

Енергія, що генерується ВЕУ за рік, розраховується за формулою:

$$E = P_{вст} \cdot T \cdot C_р,$$

де:

$P_{вст}$ = 2000 кВт – встановлена потужність ВЕУ;

T = 3000 год – кількість годин роботи на рік,

Ср = 0,35 – коефіцієнт потужності.

Тоді:

$$E = 2000 \text{ кВт} \cdot 3000 \text{ год} \cdot 0{,}35 = 2100000 \text{ кВт·год/рік}.$$

Розрахунок капітальних витрат. Капітальні витрати включають вартість обладнання, будівництва, монтажу та підключення.

$$C_{кап} = P_{вст} \cdot C_{буд},$$

де

$$C_{буд} = 48000 \text{ грн/кВт}.$$

Тоді:

$$C_{кап} = 2000 \cdot 48000 = 96 \text{ млн. грн.}$$

Експлуатаційні витрати на обслуговування та підтримку системи становлять 2% від капітальних витрат на рік.

$$C_{експ} = 0{,}02 \cdot C_{кап},$$

Тоді:

$$C_{експ} = 0{,}02 \cdot 96 \text{ млн.} = 1{,}92 \text{ млн. грн./рік.}$$

Розрахунок доходу від продажу електроенергії.

Дохід розраховується як добуток обсягу виробленої енергії на тариф.

$$C_{дох} = E \cdot C_{тар}$$

Тоді:

$$C_{дох} = E \cdot C_{тар} = 2100000 \cdot 0{,}1 = 210000 \text{ \$/рік.}$$

Термін окупності визначається як відношення капітальних витрат до чистого річного доходу:

$$T_{ок} = C_{кап} / (C_{дох} - C_{експ})$$

Тоді:

$$T_{ок} = C_{кап} / (C_{дох} - C_{експ}) = 96 \text{ млн.}/(210000 - 48000) \approx 15.2 \text{ років.}$$

Зведемо результати розрахунків в таблицю 3.2

Таблиця 3.2 – Узагальнена таблиця результатів

Показник	Значення
Потужність ВЕУ, МВт	2
Річне виробництво електроенергії, кВт·год/рік	2100000
Капітальні витрати, дол.	2400000
Експлуатаційні витрати, дол/рік	48000
Дохід від продажу енергії, дол/рік	210000
Термін окупності, років	15

Таким чином, за умов середньої швидкості вітру 7 м/с встановлення вітроенергетичної установки потужністю 2 МВт є технічно та економічно доцільним. З урахуванням можливостей субсидій і подальшого зниження витрат на експлуатацію, проект є прийнятним для інвестицій у відновлювану енергетику, незважаючи на те, що його окупність становить приблизно п’ятнадцять років.

Використання більш ефективних генераторів, оптимізація систем накопичення енергії та інтеграція в розумні мережі є кількома прикладами подальших підвищення продуктивності.

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі розглядалися та досліджувалися основні елементи підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок (ВЕУ).

Згідно з роботою, створення відновлюваної енергетики, зокрема вітрової, є ключовим кроком до досягнення енергетичної незалежності та зменшення екологічного навантаження. До 2050 року світові тенденції передбачають поступове збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальному енергетичному балансі до 50 %. Для підвищення ефективності використання енергії вітру необхідно продовжувати впроваджувати інноваційні технології.

На ефективність роботи ВЕУ впливає низка факторів, включаючи швидкість вітру, щільність повітря, турбулентність і висоту установки. Встановлено, що місця з середньою швидкістю вітру понад 5 м/с найкраще підходять для розміщення вітрових установок.

В дослідженні розглянуто два основні типи ВЕУ: горизонтально-осьові та вертикально-осьові. Крім того, вони розділені на групи відповідно до потужності, кількості лопатей і принципу використання енергії. Особливу увагу приділено сучасним генераторам та силовим перетворювачам, які впливають на продуктивність системи.

Використання синхронних генераторів з постійними магнітами, оптимізація систем накопичення енергії та інтеграція в розумні мережі – це деякі з новітніх технологій, які запропоновано впровадити. Сучасні технології можуть підвищити коефіцієнт потужності системи та зменшити втрати енергії.

У результаті проведеного техніко-економічного розрахунку було встановлено, що використання ВЕУ потужністю 2 МВт при середній швидкості вітру 7 м/с є оптимальним. 2100000 кВт·год електроенергії виробляється щорічно, що забезпечує дохід у розмірі 8400 тис. грн. за «зеленим тарифом». Термін окупності проекту становить приблизно

п’ятнадцять років, що є сприятливим періодом для інвестицій у відновлювану енергетику.

Дослідження, спрямовані на оптимізацію систем керування, впровадження більш ефективних конструкцій лопатей і покращення процесу інтеграції ВЕУ до енергетичних мереж, повинні бути центром подальших досліджень. Особливу увагу слід приділити впровадженню інновацій у сфері енергоефективності та адаптації технологій до регіональних умов.

Таким чином, дослідження підтверджують технічну та економічну доцільність використання вітроенергетичних установок, щоб підвищити незалежність та стабільність енергетичної системи країни. Запропоновані рішення сприятимуть розвитку відновлюваної енергетики в Україні та значно зменшать екологічний вплив.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Міжнародне енергетичне агентство. (2023). World Energy Outlook 2023. Париж: MEA. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

2 Міжнародне енергетичне агентство. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Париж: MEA. URL: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050

3 Бистрицький Г.Ф. Загальна енергетика: Навч. посібник для середовищ. проф. освіти: - М.: Видавничий центр «Академія», 2005. – 208 с.

4 Воронін С.М. Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії: Навчальний посібник. - Зерноград: ФГТУ ВПО АЧГАА, 2007. – 204 с.

5 El-atab N., Babatain W., Bahabry R. та ін. Ultra-flexible Corrugated Monocrystalline Silicon Solar Cells with High Efficiency (19%). ACS Applied Materials & Interfaces. 2019. Vol. 11, No. 41. P. 37966–37974. URL: https://doi.org/10.1021/acsami.9b09295

6 Yang D., Yin H. Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011. Vol. 26, No. 2. P. 662–670. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5749882

7 Державна служба статистики України. Статистичний звіт про енергоспоживання України за 2021 рік. URL: https://uaea.com.ua/news/pek-news/ee-consumption-12.html

8 Центр Разумкова. Споживання електроенергії в опалювальний сезон 2022–2023 років. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/spozhyvannia-elektroenerhii-v-mynulyi-osinno-zymovyi-period-zroslo-na-16

9 Державна служба статистики України. Структура виробництва електроенергії в Україні за 2021 рік. URL: https://uaea.com.ua/dysp/electricity.html

10 В. Г. Петрук, С. С. Коцюбинська, і Д. В. Мацюк, «Енергетичний потенціал альтернативної енергетики в Україні», Вісник ВПІ, вип. 4, с. 90–93, Листоп. 2010

11 Вітроенергетика / Под ред. Д. де Рензо: Пер. з англ.; У 39 під ред. Я. І. Шефтер. - М.: Енергоатом виданий, 1982

12 Бриль А.О., Васько В.П., Васько П.Ф. Особливості функціонування промислових вітроелектричних станцій у складі регіональної електросистеми // Доповіді III міжнародної конференції “Нетрадиційна енергетика в XXI столітті”, Крим, Судак, 9-15 вересня 2002 р. – Київ: ІТТФ НАНУ. – 2002. – С. 112-113

13 Johnson G. Wind Energy Systems. New York, NY: Prentice Hall, 1985. - 421 p.

14 Murray A. Sensorless Motor Control Simplifies Washer Drives// Power Electronics Technology, June2006. – P.14-21

15 Leung, D., Yang, Y. Wind energy development and its environmental impact: A review. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2012. T. 16. C. 1031-1039. DOI: 10.1016/J.RSER.2011.09.024

16 Pryor, S., Barthelmie, R., Bukovsky, M., Leung, L., Sakaguchi, K. Climate change impacts on wind power generation. Nature Reviews Earth & Environment. 2020. T. 1. C. 627-643. DOI: 10.1038/s43017-020-0101-7

17 Balat, M. A Review of Modern Wind Turbine Technology. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2009. T. 31. C. 1561-1572. DOI: 10.1080/15567030802094045

18 Lakshmi Chinmoy, S. Iniyan, R. Goic. Modeling wind power investments, policies and social benefits for deregulated electricity market – A review. Applied Energy. 2019. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2019.03.088

19 Xiuqiang He, H. Geng, Gang Mu. Modeling of wind turbine generators for power system stability studies: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.110865

20 Xinmiao Liu, Yuan Yue, Xin Huang, Wei-xiang Xu, Xun Lu. A Review of Wind Energy Output Simulation for New Power System Planning. Frontiers in Energy Research. 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.942450