МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Покращення показників роботи вітроенергетичної установки

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1413-з
спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

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

Боднар О.О.
(ініціали та прізвище)
Керівник проф., проф., д.е.н. Паршин Ю.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент_асистент Коваленко І.І._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

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 другий (магістерський) 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

“_01_” __грудня__2024 року

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

Боднар Олександр Олександрович

1. Тема роботи: Покращення показників роботи вітроенергетичної установки_
Керівник роботи: Паршин Ю.І.
затверджені наказом ЗНУ від «_01_»_травня__2024__року №_365-с___

2. Строк подання студентом роботи: 28 лютого 2024 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) огляд сучасних насосних систем; 3) електропривод насосів; 4) принципова схема ланки «перетворювач частоти – асинхронний двигун»; 5) висновки

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Паршин Ю.І., професор		
Розділ 2	Паршин Ю.І., професор		
Розділ 3	Паршин Ю.І., професор		
Нормоконтроль	Коваленко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання 01.06.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Огляд сучасних ВДЕ систем	01.10.2024	
2	Аналіз вітроенергетичних установок	01.11.2024	
3	Покращення ефективності роботи вітроенергетичних установок	01.12.2024	

Студент _____ Боднар О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи _____ Паршин Ю.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено шляхи покращення ефективності роботи вітроенергетичних установок. Проведено детальний аналіз сучасних технологій, конструктивних рішень і характеристик вітрових потоків. Визначено фактори, що впливають на енергоефективність, та обґрунтовано шляхи оптимізації. Розроблено рекомендації для інтеграції інноваційних технологій, спрямованих на підвищення стабільності та продуктивності вітроенергетичних систем в умовах України.

Ключові слова: вітроенергетика, відновлювані джерела енергії, вітрові потоки, енергоефективність, генератори, інноваційні технології.

ANOTATION

The study explores ways to improve the efficiency of wind energy installations. A detailed analysis of modern technologies, design solutions, and wind flow characteristics has been conducted. Factors affecting energy efficiency have been identified, and optimization approaches have been substantiated. Recommendations for integrating innovative technologies aimed at enhancing the stability and productivity of wind energy systems in Ukraine have been developed.

Keywords: wind energy, renewable energy sources, wind flows, energy efficiency, generators, innovative technologies.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВДЕ СИСТЕМ 8
1.1 Світове споживання енергоресурсів 8
1.2 Класифікація відновлюваних джерел енергії 12
1.3 Енергетичний потенціал України 20
2 АНАЛІЗ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК 26
2.1 Параметри вітрового потоку 26
2.2 Класифікація вітроенергетичних установок 30
2.3 Типи використовуваних генераторів і силових перетворювачів 34
2.4 Конструктивні особливості та принцип дії вітрових генераторів 41
3 ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК 45
3.1 Основні можливі напрями підвищення ефективності вітроенергетичних установок 45
3.2 Енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні 47
3.3 Покращення системи керування вітроенергетичної установки 51
3.4 Моделювання системи ВЕУ 56
3.5 Техніко-економічний розрахунок впровадження ВЕУ 63
ВИСНОВКИ 66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 68
ДОДАТКИ 70

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики орієнтований на зменшення залежності від викопних джерел енергії та перехід до використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Це обумовлено як зменшенням запасів традиційних паливних ресурсів, так і необхідністю зниження викидів парникових газів. Вітроенергетика, як одна з найперспективніших галузей ВДЕ, демонструє постійний ріст та залучає значні інвестиції у всьому світі. Однак ефективність роботи вітроенергетичних установок (ВЕУ) значною мірою залежить від багатьох факторів, таких як характеристики вітрового потоку, конструктивні особливості обладнання та застосування сучасних технологій. Удосконалення цих аспектів сприяє підвищенню енергоефективності та економічної доцільності вітрових установок, що є особливо важливим для України, яка прагне зміцнити енергетичну незалежність у складних умовах військових дій.

Метою даної роботи є аналіз сучасних підходів до підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок, обґрунтування шляхів покращення їх техніко-економічних показників, а також розробка рекомендацій щодо впровадження інноваційних технологій у цій сфері.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

- провести аналіз сучасних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики, зокрема вітроенергетики;
- вивчити характеристики вітрових потоків та їх вплив на ефективність роботи ВЕУ;
- дослідити основні типи вітроенергетичних установок, їх класифікацію та конструктивні особливості;
- розглянути сучасні технології генерації електроенергії у ВЕУ, включаючи типи генераторів та силових перетворювачів;
- обґрунтувати шляхи підвищення ефективності роботи ВЕУ шляхом впровадження новітніх технологій та оптимізації існуючих рішень;

- розробити практичні рекомендації щодо впровадження інноваційних підходів в Україні.

Об'єктом дослідження є процеси генерації електроенергії за допомогою вітроенергетичних установок, їх функціонування та взаємодія з енергетичною системою.

Предметом дослідження є шляхи покращення показників роботи вітроенергетичних установок, включаючи вдосконалення конструктивних рішень, оптимізацію процесів перетворення енергії вітру на електричну енергію та підвищення ефективності використання вітрового потенціалу.

Важливість даної роботи полягає в її спрямованості на вирішення однієї з ключових проблем енергетичного сектору – забезпечення стабільності та ефективності роботи ВДЕ. Впровадження нових рішень дозволить не лише зменшити залежність від викопного палива, а й сприятиме досягненню екологічних та енергетичних цілей країни.

Таким чином, дослідження спрямоване на вирішення актуальних завдань енергетики, пов'язаних із підвищенням ефективності вітроенергетичних установок, та розробку практичних рекомендацій щодо їх впровадження в Україні.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВДЕ СИСТЕМ

1.1 Світове споживання енергоресурсів

Світове споживання енергоресурсів є ключовим індикатором економічного розвитку та технологічного прогресу. Структура та обсяги енергоспоживання відображають як глобальні тенденції, так і регіональні особливості.

Загалом світове енергоспоживання має тенденції до зростання попиту, зміни структури енергоспоживання, зміщення до екологічних джерел. Світове споживання енергії постійно зростає через збільшення населення та індустріалізацію, причому основний приріст спостерігається у країнах, що розвиваються (Індія, Китай). Викопні джерела (вугілля, нафта, газ) досі займають близько 80 % у глобальному енергобалансі, але частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) постійно зростає завдяки технологічному прогресу та кліматичним цілям. Традиційні викопні джерела є основним джерелом викидів CO_2. Тому намагання знизити викиди CO_2 стимулюють використання ВДЕ, зокрема сонячної та вітрової енергетики. Тим більше, що існує необхідність адаптації до Паризької кліматичної угоди.

Можна впевнено припустити, що потреба в енергетиці лише буде зростати. Вже зараз близько 760 мільйонів людей у світі не мають доступу до електроенергії [1].

Іншим надважливим аспектом необхідності розвитку енергетики є енергетична незалежність. Геополітичні ризики, зокрема залежність від імпорту нафти й газу, загрожують стабільності енергосистем. З лютого 2022 року українська енергоінфраструктура потерпає від терористичних ударів рашистської федерації. Так звана росія веде геноцидну війну проти України і намагання знищити енергетику нашої країни є додатковим свідченням саме геноцидної компоненти цієї війни. Досвід війни показує, що енергетика має бути кардинально трансформована і одним із напрямків розвитку енергетики

є впровадження відновлювальних джерел енергії. ВДЕ, окрім зменшення навантаження на запаси природних копалин і навколишнє середовище, дозволяють зробити енергосистему більш стабільною та незалежною від зовнішніх факторів.

Також слід пам’ятати, що зниження запасів викопних енергоносіїв створює потребу у диверсифікації енергетичних джерел. Передбачається збільшення частки ВДЕ до 50% у загальному енергобалансі до 2050 року [2].

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

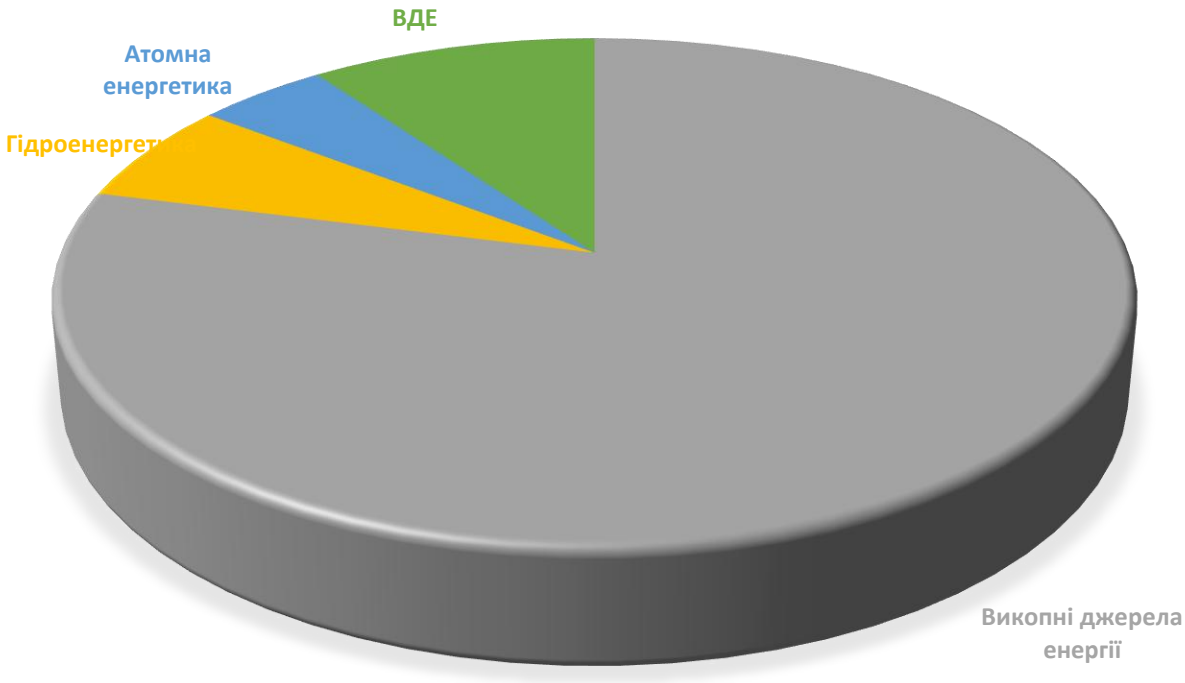


Рисунок 1.1 – Структура світового енергоспоживання:
викопні джерела ~ 79 %; гідроенергетика ~ 6,4 %;
атомна енергетика ~ 4,6 %; ВДЕ ~ 10 %

Структуру світового енергоспоживання викопних джерел енергії наведено на рисунку 1.2.

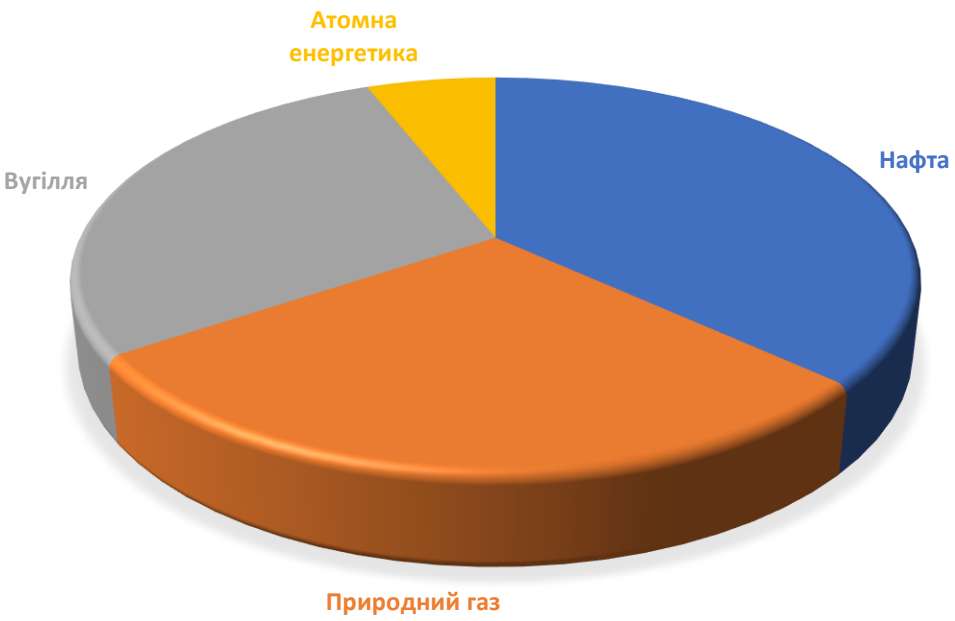


Рисунок 1.2 – Структура світового енергоспоживання викопних джерел енергії

Розподіл вироблення відновлювальних джерел енергії наведено на рисунку 1.3.

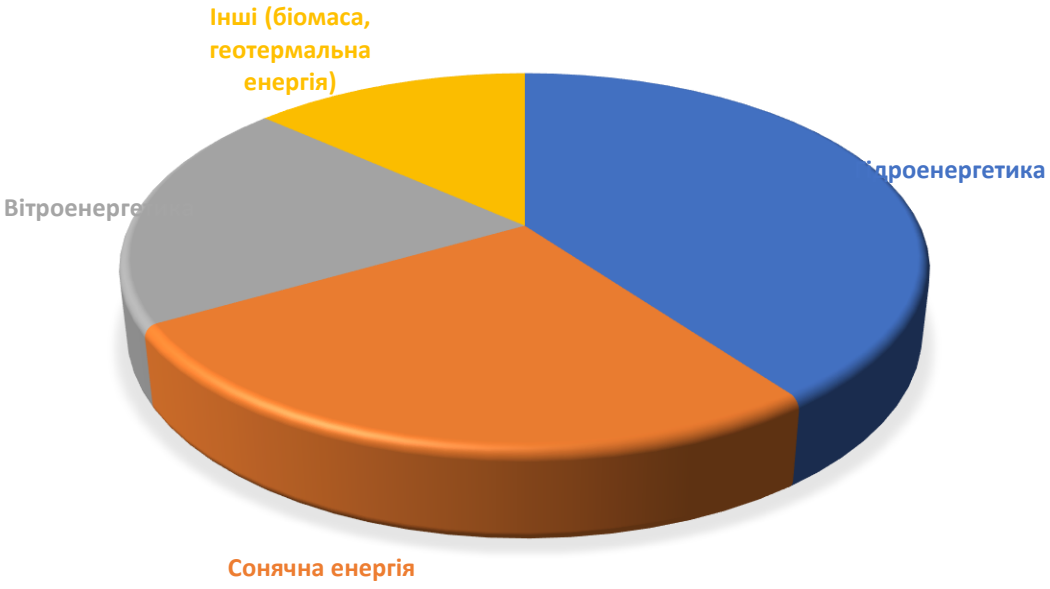


Рисунок 1.3 – Розподіл вироблення відновлювальних джерел енергії: гідроенергетика ~ 6 %; сонячна енергія ~ 4 %; вітроенергетика ~ 3 %, інші (біомаса, геотермальна енергія) ~ 3 %

Основним споживачем нафти є транспортний сектор (приблизно 65 % загального споживання нафти). Обсяг споживання нафти складає 88…90 млн барелів на день. Найбільшими споживачами нафти є США (приблизно 20 % від світового споживання) та Китай – 14 %. Споживання нафти викликає відомі екологічні проблеми, наприклад, викиди CO_2 складають біля 2,3 кг на літр спаленого палива.

Основним споживачем природного газу є енергетичний сектор. На виробництво електроенергії приходиться близько 40 % всього спожитого газу. Обсяг споживання складає приблизно 4 трлн кубометрів. Якщо порівнювати газ з іншим джерелом для вироблення енергії – вугіллям, то газ є набагато кращим з екологічної точки зору.

Основним споживачем вугілля є також електроенергетика, близько 70 % від загального споживання. Обсяг споживання становить біля 8 млрд тонн. Найбільшими споживачами вугілля серед країн є Китай та Індія. Дане паливо є важким для екології, де викиди CO_2 складають приблизно 2,2 т на тонну спаленого вугілля. При цьому відбуваються викиди сірки та твердих часток.

Серед відновлюваних джерел енергії на даний момент лідером є гідроенергетика (рис. 1.3) з обсягом виробництва близько 4300 ТВт·год. Відомою проблемою використання гідроенергетики є вплив на екосистему і залежність від сезонності.

Обсяг виробництва сонячної енергетики складає приблизно 1200 ГВт встановленої потужності. Найбільших успіхів у цьому секторі досягнув Китай (понад 35% від загального обсягу), США – 12 %. Але зауважимо, що сонячна енергетика активно розвивається.

Обсяг виробництва вітроенергетики складає приблизно 850 ГВт встановленої потужності. Лідером серед країн також є Китай – 36 %, США – 16 %, Німеччина – 9 %. Вітроенергетика також активно розвивається.

Використання біомаси також є перспективним напрямком. Основним виробником є ЄС – 60 % від усього виробництва біоенергії.

Атомна енергетика викликає досі багато сперечань. З одного боку існує проблема утилізації ядерних відходів і питання безпеки. З іншого боку ця енергетика не має викидів парникових газів, а електроенергія виходить найдешевшою. Лідером в атомній енергетиці є США.

Отже, структура світового енергоспоживання демонструє домінування викопного палива, але частка відновлюваних джерел енергії поступово зростає. Технологічний прогрес, спрямований на збільшення ефективності ВДЕ, а також політика зменшення викидів CO_2, сприятимуть змінам у енергетичному балансі світу. До 2050 року очікується, що частка ВДЕ перевищить 50 %, забезпечуючи екологічну сталість та енергетичну безпеку.

1.2 Класифікація відновлюваних джерел енергії

Всі енергетичні ресурси на Землі, які є продуктами безперервної діяльності Сонця, можуть бути поділені на дві основні групи: акумулюванні природою і, в більшості випадків, не відновлювані та не акумулюванні, але постійно відновлювані (табл. 1.1). До першої групи належать запаси паливних копалин: нафта, кам'яне та буре вугілля, сланці, торф та підземні гази, а також термоядерна та ядерна енергія. До другої групи належать сонячне випромінювання, вітер, потоки річок, морські хвилі та припливи, внутрішнє тепло Землі.

Відновлюваними джерелами енергії називаються ресурси енергії, які постійно циклічно відновлюють енергетичну цінність і можуть бути перетворені на корисну роботу.

Інакше кажучи, відновлювані джерела енергії відновлюються постійно, без тимчасових обмежень, тоді як використання традиційних копалин обмежується наявними запасами. Класифікацію відновлюваних джерел енергії наведено на рисунку 1.4 [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	$17360 \cdot 10^{12}$

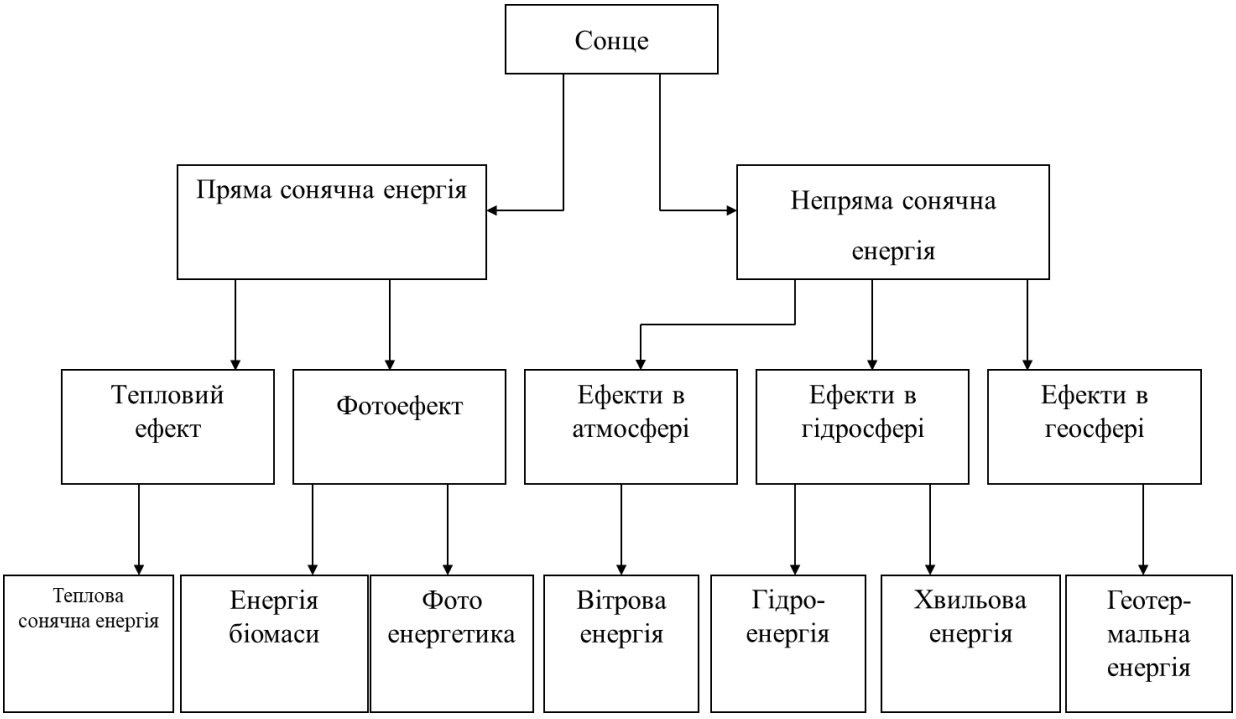


Рисунок 1.4 – Класифікація відновлюваних джерел енергії

Результатами прямої сонячної діяльності є тепловий ефект та фотоефект, внаслідок чого Земля отримує теплову енергію та світло. Результатом непрямої діяльності Сонця є відповідні ефекти в атмосфері, гідросфері та геосфері, які викликають появу вітру, хвиль, визначають течію річок, створюють умови для збереження внутрішньої теплоти Землі.

Переваги відновлюваних джерел енергії в порівнянні з традиційними:

- вони практично невичерпні;

- не забруднюють довкілля;

- відсутня необхідність у видобутку, переробці та доставці палива;

- немає потреби у використанні води для охолодження, видалення золи, відходів чи продуктів розпаду;

- немає потреби в дефіцитних високотемпературних матеріалах, за винятком сонячних концентраторів теплоти;

- можуть працювати без обслуговування;

- немає потреби у транспортуванні енергії.

Основним недоліком більшості відновлюваних джерел енергії є їх залежність від погодних умов.

Необхідність використання поновлюваних джерел енергії визначається такими факторами:

- швидким зростанням потреби в електричній енергії, споживання якої через 50 років, за деякими оцінками, зросте в середньому у 3 – 4 рази, а в розвинених країнах-в 5 - 6 разів;

- вичерпанням у найближчому майбутньому розвіданих запасів органічного палива;

- забрудненням довкілля окисами азоту та сірки, вуглекислим газом, пилоподібними залишками від згоряння видобутого палива, радіоактивним забрудненням та тепловим перегрівом при використанні ядерного палива.

Необхідність та можливість розвитку енергетики України на базі відновлюваних джерел обумовлені такими причинами:

- дефіцит традиційних для України паливно-енергетичних ресурсів;

- сприятливі клімато-метеорологічні умовами для використання основних видів поновлюваних джерел енергії;

- наявність промислової бази, придатної для виробництва практично всіх видів обладнання для поновлюваної енергетики.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) є основою переходу до екологічно сталого енергетичного розвитку. Вони забезпечують виробництво енергії без

шкоди для довкілля, використовуючи природні ресурси, які відновлюються в природному циклі.

Сонячна енергетика. Геліосистеми за призначенням і конструкцією поділяють на дві групи:

- сонячно-термальні системи (CSP);
- фотовольтаїчні системи (PV).

Сонячно-термальні системи (CSP) зосереджують сонячне тепло для нагріву води або генерації електроенергії за допомогою парових турбін (рис. 1.5). Такі системи, як правило, використовують для гарячого водопостачання, але все більше їх застосовують і для опалення у якості додаткового джерела теплової енергії. Якщо ж говорити про перетворення теплової енергії в електричну, то такі системи мають іншу конструкцію, але за принципом дії такі системи ідентичні. У будь-якому разі сонячні колектори дозволяють використовувати сонячну енергію для потреб.

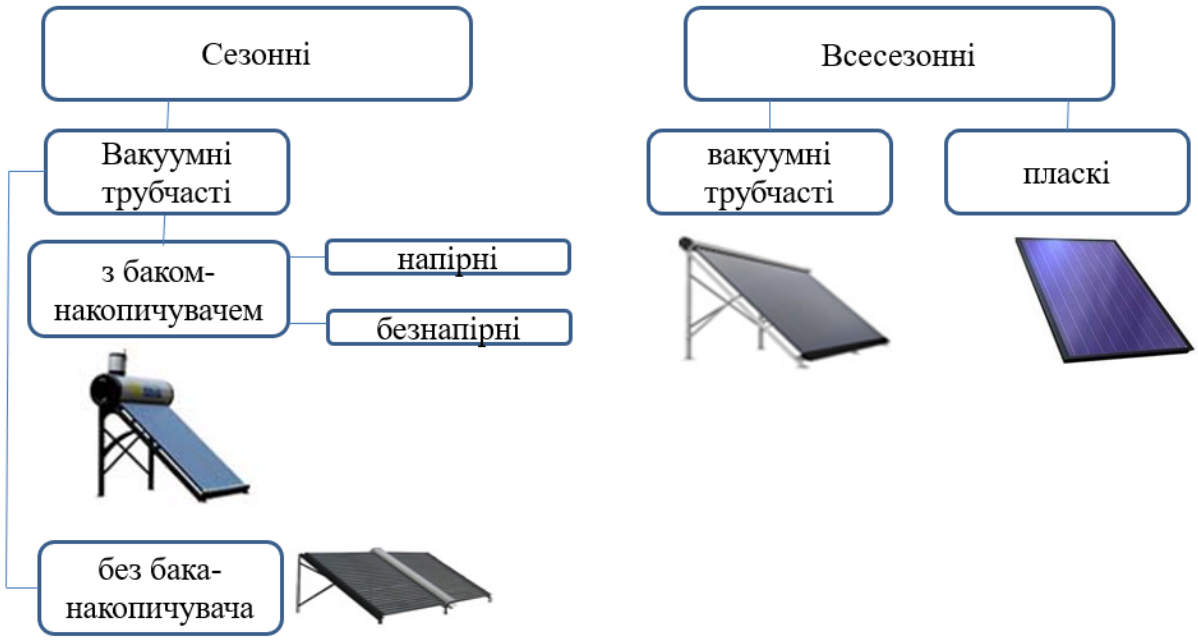
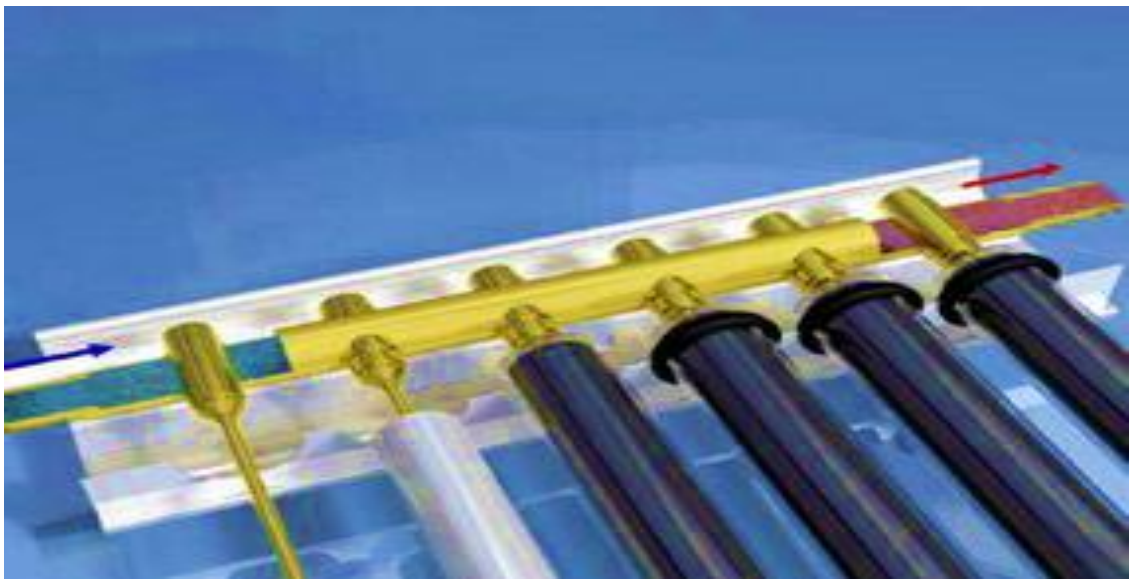
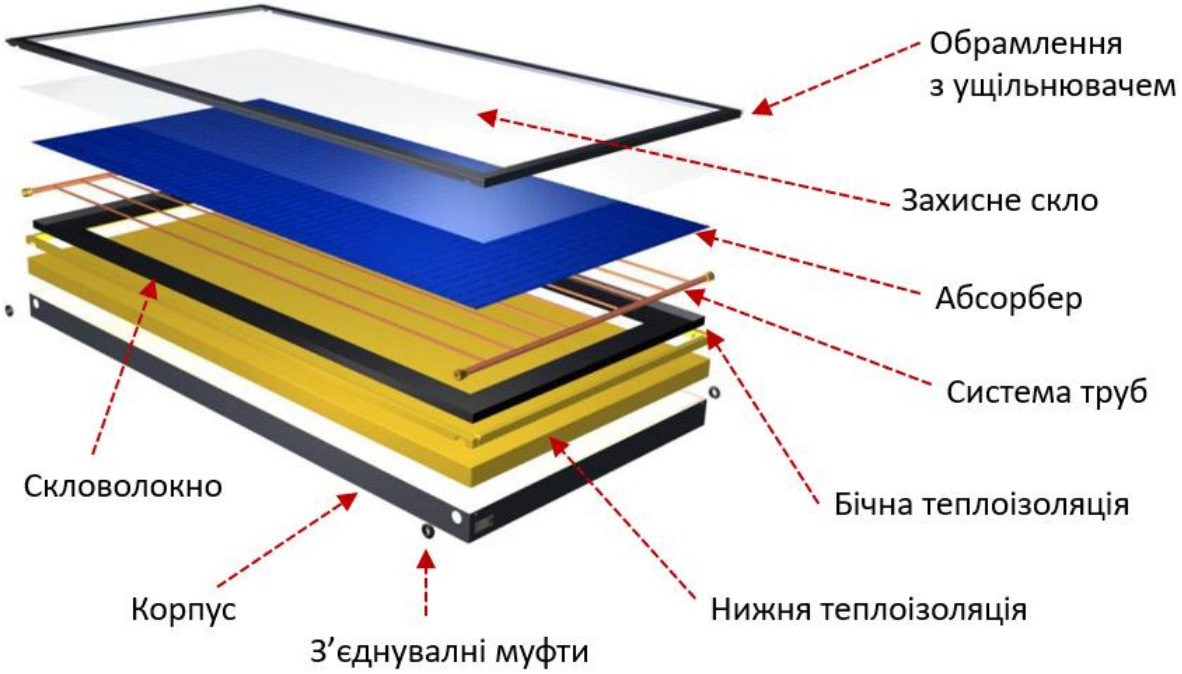


Рисунок 1.5 – Сонячні колектори для нагріву води

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

Іншим розповсюдженим застосуванням сонячної енергії є фотоенергетика. Фотовольтаїчні системи (PV) використовують сонячні панелі для перетворення світла в електроенергію.

ККД звичайних сонячних панелей зазвичай становить від 13 % до 17 %, з потенціалом підвищення до 30% при застосуванні спеціальних технологій, таких як використання активного охолодження або застосування спеціальних матеріалів.

Для фотомодулів використовують різні матеріали [5]:

- фотоелементи на основі шарових структур GaInP -GaAs-Ge, GaInP - GaAs, 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 Si (C, PC/MC, TF, A, NC, String Ribbon);
- фотоелементи на основі деселеніда галлія-міді-індія Cu(In,Ga)Se2 CIGS (TF);
- фотоелементи на основі теллуріда кадмія Cd-Te (TF).

Фотомодулі виготовляють для систем з різною напругою:

- 12-вольтні фотомодулі використовуються переважно у системах із контролерами заряду та акумуляторами для автономних систем споживачів, для зарядних пристроїв для акумуляторів;

- 24-вольтні фотомодулі (вища напруга дозволяє зменшити втрати енергії при передачі) застосовуються у середніх системах, наприклад, для споживачів із більшою енергопотребою;

- 48-вольтні фотомодулі та вищі. Більш висока напруга дозволяє зменшити струм і, відповідно, втрати енергії в кабелях. Використовуються у великих сонячних системах, таких як системи для комерційних будівель, великі автономні системи, промислові та мережеві системи;

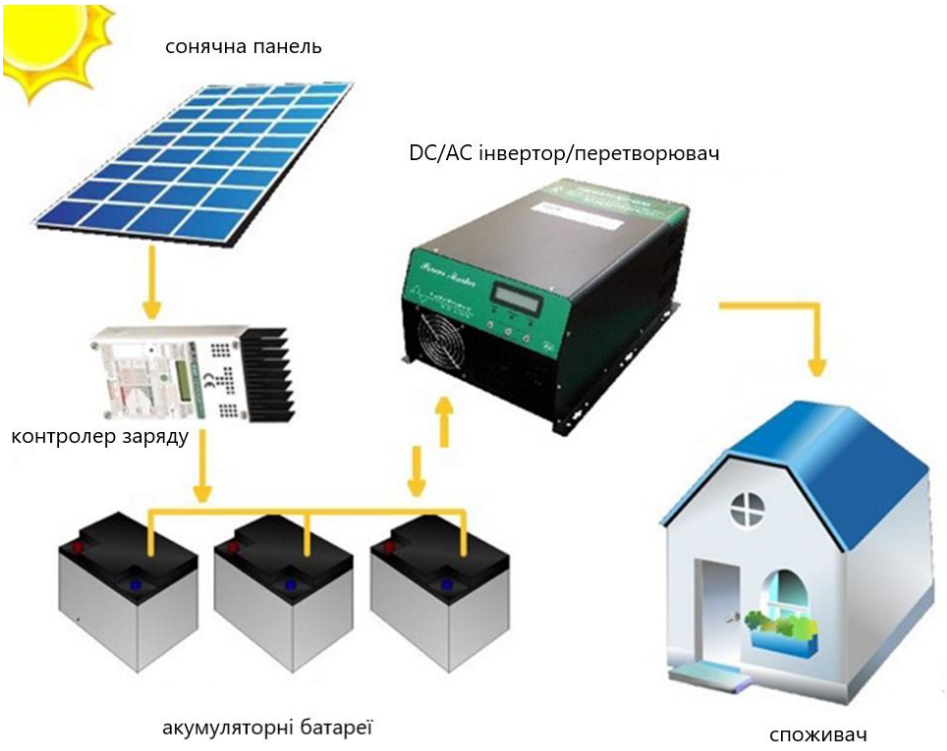
- мережеві високовольтні фотомодулі для мережевих систем, які підключаються до інверторів, можуть мати напругу понад 600 В (для ланцюгів із кількох модулів). Використовуються у великих сонячних електростанціях;

- напруга відкритого кола (V_{oc}). Кожен модуль має максимальну напругу відкритого кола, яка визначається технічними характеристиками. Наприклад, для 12-вольтних модулів Voc ≈ 18…22 В; для 24-вольтних Voc ≈ 36…44 В.

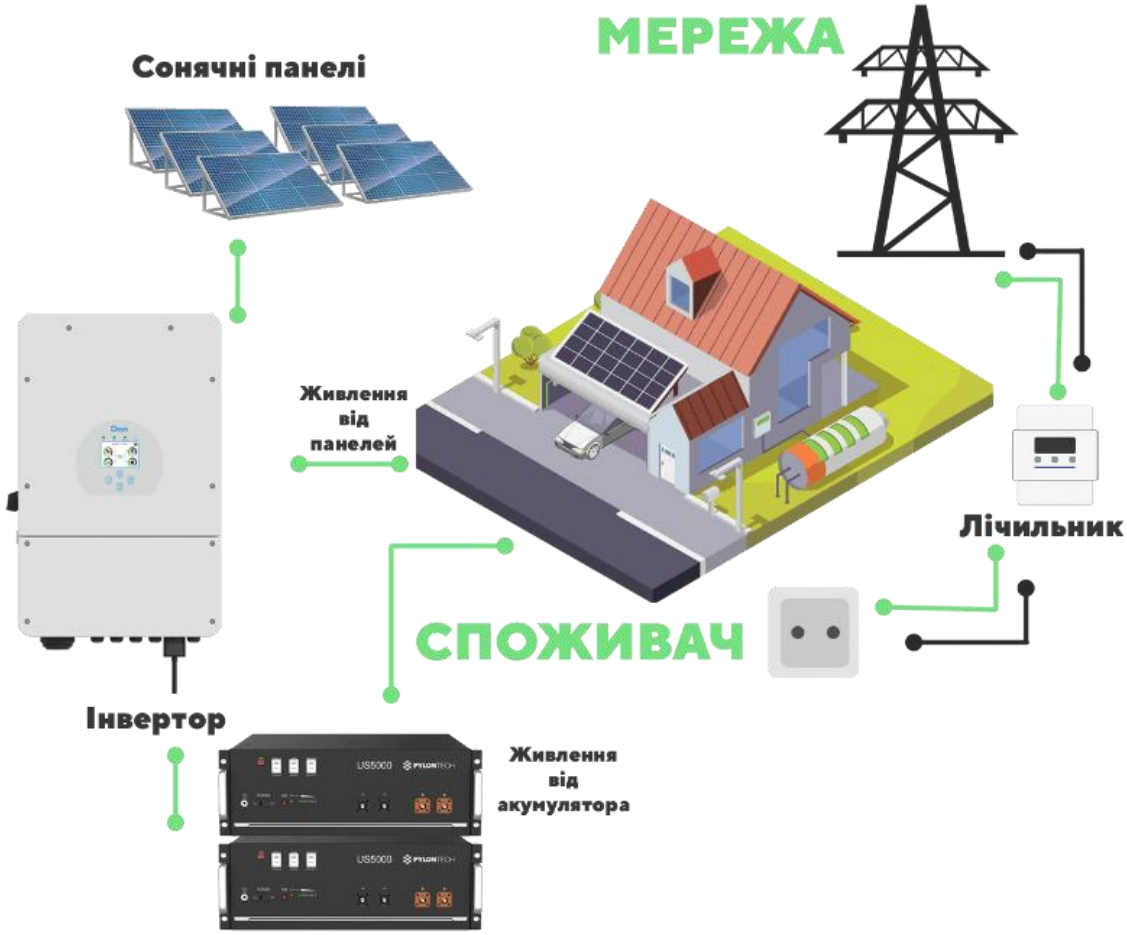
Сонячні електростанції, які використовують для відносно невеликих споживачів поділяють за принципом взаємодії з мережею: «On-grid», «Off-grid» та гібридна (рис. 1.7) [6].



а)



б)



в)

Рисунок 1.7 – Сонячні електростанції:

а) On-grid; б) Off-grid; в) гібридна

Вітроенергетика включає типи установок:

- наземні вітроелектростанції (Onshore), які встановлюються на суші, де швидкість вітру є стабільною;
- офшорні вітроелектростанції (Offshore) розташовують на морських платформах із високим потенціалом вітрової енергії.

Перевагами вітроенергетики є висока ефективність у вітряних регіонах, можливість масштабування. Недоліками є шумовий вплив на довкілля, дорогі монтажні роботи для офшорних установок, бувають аварійні руйнування вітряних установок.

Більш детально даний пункт буде розглянуто далі.

Гідроелектростанції (ГЕС) використовують енергію потоків води. Міні-ГЕС підходять для малих річок, що робить їх привабливими для локального використання.

Геотермальна енергетика використовує тепло, що генерується в земній корі для виробництва електроенергії або теплопостачання. Позитивною рисою даного виду енергетики є незалежність від погодних умов та стабільність енергетичного потоку. Але проблемним є висока вартість буріння свердловин, локальність застосування через специфічні геологічні умови.

Біогазові установки використовують органічні відходи для виробництва газу. Біомасові електростанції генерують енергію через спалювання біомаси.

1.3 Енергетичний потенціал України

Енергетичний потенціал нашої держави складають як органічні копалини природних енергетичних ресурсів, так і відновлювані джерела енергії.

Паливно-енергетичний комплекс (ПЕК) України складається з електроенергетики та паливної промисловості. Паливна промисловість охоплює сукупність процесів з видобутку природних видів палива та їх переробки, що реалізується вугільною, газовою, нафтовою та нафтопереробною, торф'яною та атомною промисловістю. ПЕК є складною міжгалузевою системою видобутку та виробництва палива та енергії, їх транспортування, розподілу та використання. Він є базовим комплексом для будь-якої держави. Від його розвитку залежать темпи, масштаби та техніко-економічні показники всього виробництва, зокрема промисловості, сільського господарства, транспорту.

Зазначимо, що в Україні було досягнуто рекордного видобутку окремих видів ПЕР: 218 млн. т вугілля 1976 р., 14,4 млн. т нафти, зокрема газового конденсату, 1972 р., 68,7 млрд. м3 природного газу 1975 р. Основний органічний енергоносій у нашій державі - вугілля, кам'яне та буре. Ресурсна

база кам'яного вугілля складає 94,5%, бурого – 5,5%. Перші родовища вугілля в Україні на Донбасі були відкриті ще у 1721 р.

Структура енергоспоживання в Україні характеризується значною залежністю від викопних видів палива, проте спостерігається поступове збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Згідно з даними Державної служби статистики України та Міністерства енергетики, станом на 2021 рік (дані взяті для періоду до повномасштабного вторгнення росії) структура кінцевого споживання електроенергії за секторами виглядала наступним чином [7 – 9]:

- 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 %.

У 2021 році загальне споживання електроенергії в Україні становило 154 825,7 млн кВт·год, що на 5,7 % більше порівняно з попереднім роком. Відпуск електроенергії споживачам (нетто) збільшився на 6,4 % і склав 125 482,9 млн кВт·год.

Варто зазначити, що внаслідок військових дій та економічних змін структура енергоспоживання в Україні зазнала значних коливань. Зокрема, в опалювальний сезон 2022 – 2023 років споживання електроенергії населенням та промисловістю зменшилося на 42,5 % порівняно з аналогічним періодом 2021–2022 років, досягнувши 18,9 млрд кВт·год. Однак у наступному опалювальному сезоні 2023 – 2024 років споживання зросло на 16,4 %, до 22 млрд кВт·год [7]. Щодо структури виробництва електроенергії, за 2021 рік в Україні було вироблено 156 575,7 млн кВт·год [8, 9].

За загальними оцінками, у надрах України може бути зосереджено до 300 млрд. т вугілля. Якщо, за даними західних експертів, світових запасів

нафти та газу вистачить на 90 років, вугілля – на 350 років, вітчизняних запасів вугілля вистачить на 400 років. Це дає можливість розглядати сучасну вугільну енергетику як пріоритетну, а вугілля – як основний енергетичний ресурс України. Балансові, позабалансові та прогнозовані ресурси вугілля в Україні становлять 117,3 млрд. т, розвідані запаси за категоріями – 52,6 млрд. т, з них коксівний вугілля – 17,7 млрд. т (31%), антрацити – 8,3 млрд. т (11,5%). У розробці та підготовці для освоєння знаходяться запаси 23,6 млрд. т [8, 9].

Більшість значних родовищ нафти України вже вичерпано майже на проектний рівень. Наприклад, рівень нафтовидобутку Лелякевського родовища досяг 59 %, при проектному рівні – 62,2 %, Гнідинцівського родовища, відповідно, - 61,1 % та 62,2 %, Прилуцького – 53,2 % та 56,6 %, Качанєвського – 43,5 % та 45,6 %, Долинського – 30,6 % та 33,7 %. Загальна потужність вітчизняних НПЗ становить майже 60 млн т за рік, але завантажені вони не повністю. Потужності українських НПЗ завантажені приблизно на 29% [8, 9].

Газовидобуток в Україні відзначений ще у 1901-1902 рр. під час будівництва соляних шахт у Прикарпатті. Перші промислові надходження було отримано у районі Калуша 1921 р. на Дашавському родовищі, а 1924 р. прокладено перший газопровід від Дашави до Стрию. Природні горючі гази знайдено у тих районах, як і нафту. Для видобутку газу нині у Прикарпатському районі експлуатуються такі основні родовища: Рудківське, Опарське, Ходновицьке, Битківське, Калуське, Кадобнянське. На сьогодні запаси Дашавського родовища майже вичерпані. Воно використовується як газосховище. Природний газ Прикарпаття характеризується високим вмістом метану (до 98%).

У Причорноморському нафтогазоносному районі великі родовища природного газу відкрито у Криму: Джанкойське, Глібівське, Задорнянське, Західно-Жовтневе, Краснополянське. Загальні запаси тут сягають 1254 млрд. $м^3$. Родовища газу було знайдено у Північному Криму ще 1960 р., а під Азовським морем у 70-х роках. Нині шельфові родовища залишаються

переважно нерозвіданими, на глибині моря менше 60 м було виявлено 10 родовищ. Найбільші родовища на шельфі Південної України – це Галицинське та Шмідта. У експлуатації перебувають 115 газових родовищ, балансові запаси природного газу у яких становлять 830 млрд. $м^3$. Загальні запаси газу за категоріями становлять понад 1120 млрд. $м^3$.

Істотне значення підвищення рівня самоенергозабезпечення України мають поклади уранової руди. Наша держава займає одне з найвизначніших місць у Європі з її видобутку. Прогнозні запаси уранової руди у Дніпропетровській обл. становлять 40 тис. т. Розвіданих запасів уранової руди вистачить для ядерного палива з урахуванням кількості блоків АЕС на 150 років. Виробництво електричної та теплової енергії – сумарна встановлена потужність електростанцій України становила у 1998 р. 53,9 млн. кВт., у тому числі ТЕС та ГЕС Міненерго України відповідно – 36,4 млн. кВт та 4,7 млн. кВт (67% та 9%); АЕС Міненерго України – 12,8 млн. кВт (24%); блок-станцій інших міністерств та відомств – 4,3 млн. кВт (7,7%). В Україні працює 8 великих ГЕС, 25 середніх та 1 гідроакумулююча електростанція (ГАЕС). АЕС в Україні є: Запорізька (певна потужність, МВт - 6000; кількість та електрична потужність енергоблоків, шт.•МВт - 6•1000), Южно-Українська (3000; 3•1000), Чорнобильська (2000; 2•1000) , Рівненська (1818; 1 • 1000, 1 • 416, 1 • 402), Хмельницька (1000; 1 • 1000). 2001 року в Україні вироблено загалом 172,2 млрд. дол. кВт•год електроенергії, що на 1,4 млрд. кВт•год більше, ніж у 2000 року. Очевидним є зростання вироблення електроенергії – так на 2005 рік планується виробити 180 млрд. кВт•год [10].

Україна має певний потенціал у відновлювальній енергетиці. Наша країна знаходиться у Східній Європі і має помірно-континентальний клімат, а у південних регіонах, зокрема в зоні Причорномор’я та Криму, клімат наближається до субтропічного середземноморського. Взимку температура може досягати 30 С мороза, а влітку температура може триматися більше 40 С в тіні. Ці спостереження показують ті виклики, з якими стикаються будівельники та енергетики. Тобто необхідно вирішувати проблеми обігріву

та охолодження будівель, знаходити енергоефективні рішення. Крім того при проектуванні ВДЕ необхідно враховувати кліматичну зону і середні погодні умови в цій зоні. Наприклад, якщо південні регіони мають значний потенціал для сонячної енергетики, то можливості для вітрової енергетики знаходяться переважно у степових і прибережних районах. За підтримки Європейської комісії, PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) створила карту потенціалу сонячної енергії та річну інсоляцію для України (рис. 1.8). Але треба враховувати, що потужність сонячного випромінювання на поверхні Землі за стандартних умов може коливатись від 0 до 1000 Вт/м^2.

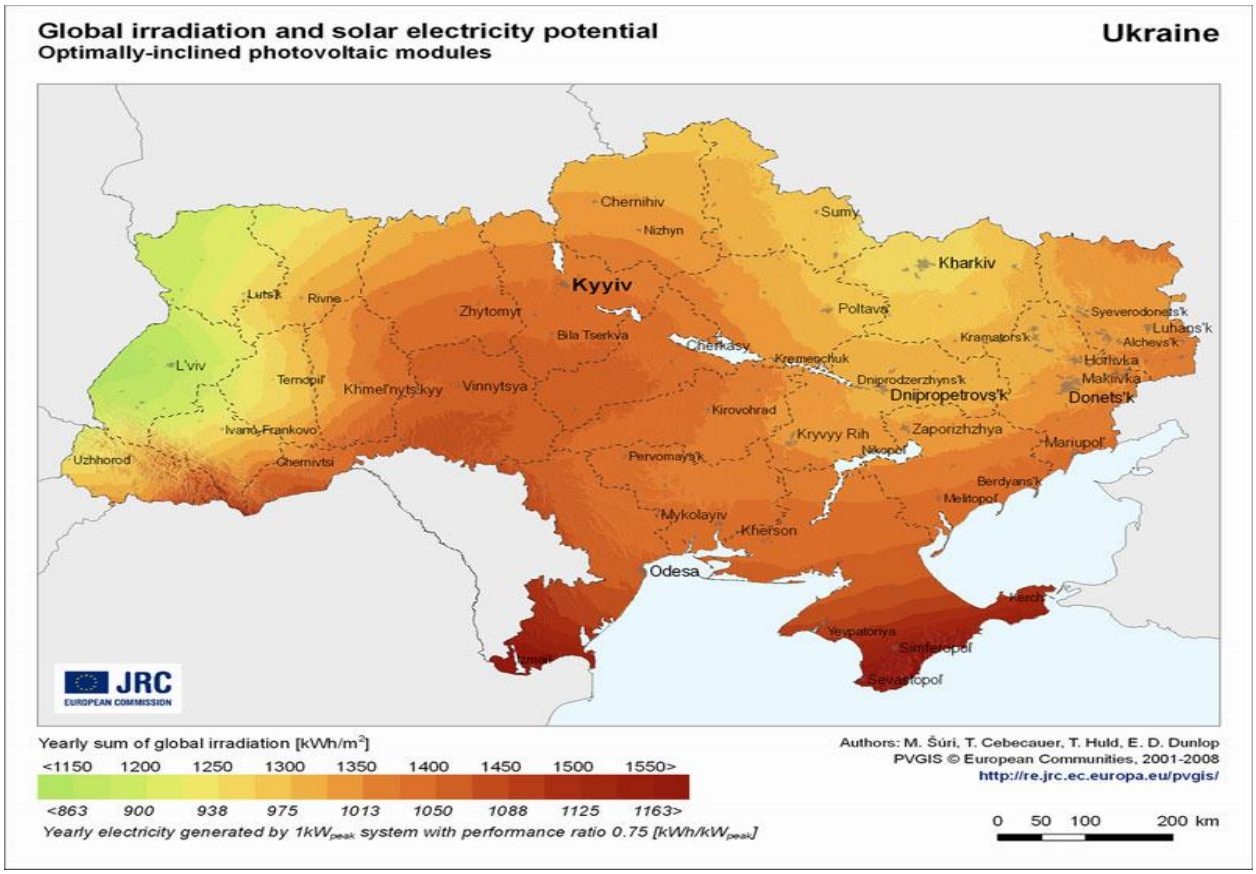


Рисунок 1.8 – Географічні та кліматичні фактори (за даними PVGIS)

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

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

2 АНАЛІЗ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

2.1 Параметри вітрового потоку

Вітровий потік характеризується фізичними параметрами, які визначають його поведінку та вплив на об’єкти, такі як вітрові турбіни, будівлі та природні об’єкти. Основними характеристиками вітрового потоку є:

- 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:

$$P \propto v^3$$

Швидкість вітру визначається висотою над рівнем землі. Вітер, коли він близько до землі, сповільнюється через тертя землі. Таким чином, вітри сильніші на високих висотах порівняно з землею. Швидкість вітру збільшується приблизно на 12% на сільськогосподарських полях і пустельних територіях, коли висота над поверхнею землі збільшується в два рази.

Швидкість вітру значною мірою впливає на географічні умови та характер земної поверхні. Ці умови включають різноманітні природні та штучні перешкоди, такі як пагорби, а також дерева та будівлі. З цієї причини ВЕУ розташовують на висотах і віддалених від високих дерев, житлових будинків та інших споруд, оскільки ці перешкоди знижують швидкість вітру і сприяють завихренню потоку, що ускладнює перетворення енергії вітру.

Середньорічна швидкість вітру показує вітровий потенціал регіону. Це швидкість вітру, яку можна знайти як середнє арифметичне значення всіх швидкостей вітру, спостережуваних протягом року. Середні швидкості вітру можна також розрахувати для різних періодів, таких як місячні, денні та вартові.

Кубічна залежність швидкості вітру характеризує кількість енергії, укладеної в вітрі. Швидкість вітру збільшує енергію в шість разів. Таким чином, вітер зі середньою швидкістю 4 м/с може дати приблизно в два рази менше енергії, ніж вітер зі середньою швидкістю 5 м/с.

Щільність повітря (ρ) визначається як маса повітря на одиницю об'єму (кг/м^3) і залежить від температури, тиску та вологості.

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 позначається в градусах або відносно сторін світу і є важливим для орієнтації вітрових турбін і розрахунку їхньої продуктивності.

Турбулентність характеризує нерівномірність і коливання швидкості вітру в просторі та часі. Вона залежить від природних перешкод (рельєфу, будівель) 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).

Нерівномірність прояву вітрової енергії як у просторі, так і в часі є її основною характеристикою. У деяких районах швидкість вітру на висоті 10 м від рівня землі не перевищує 3 м/с протягом року. Там не можна розраховувати на те, що вітрові установки працюють добре. 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 ретельної оцінки та обґрунтування.

Кінетична енергія вітрового потоку [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.

Градієнти температури та тиску. Різниця температур і тиску між регіонами є основною причиною виникнення вітрових потоків. Потужність вітрових потоків залежить від сезонних і кліматичних умов.

Рельєф місцевості (гори, долини, рівнини) значно впливає на швидкість, турбулентність і напрямок вітру.

Отже, характеристики вітрового потоку, такі як швидкість, щільність повітря, турбулентність і напрямок, є ключовими параметрами для оцінки енергетичного потенціалу вітру, вибору місць для встановлення вітрових турбін і розрахунку їх ефективності.

У зв’язку з тим, що Сонце є основним джерелом, яке впливає на погоду на Землі, вітрову енергію можна розглядати як одну з форм прояву сонячної енергії. Нерівномірне нагрівання поверхні Землі сонцем викликає вітер.

Вітер змінюється з часом. Сезонні зміни вітрових потоків є значними у більшості регіонів. Причому швидкість вітру зазвичай вища взимку, ніж влітку. Зміни швидкості вітру, як правило, відбуваються поблизу морів і великих озер. Вранці вітер дме в напрямку узбережжя, оскільки сонце нагріває землю швидше, ніж воду. Увечері земля остигає швидше, ніж вода, тому вітер дме з узбережжя.

Метеостанції вимірюють характеристики вітру. Спеціальні карти вітру створюються на основі даних спостережень швидкостей вітру протягом багатьох років.

2.2 Класифікація вітроенергетичних установок

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) класифікують за різними критеріями, що враховують їхню конструкцію, принцип роботи, потужність та сферу застосування [14]:

1) За розташуванням відносно земної поверхні;
2) За типом ротора;
3) За потужністю;
4) За кількістю лопатей;
5) За принципом використання енергії;
6) За кількістю турбін у системі;
7) За швидкістю обертання ротора;
8) За сферою застосування;

9) За типом регулювання потужності.

За розташуванням відносно земної поверхні ВЕУ поділяють на наземні (onshore) (рис. 2.1), які встановлюються на суші і офшорні (offshore). Наземні ВЕУ характеризуються простотою обслуговування, але стабільність вітрового потоку є меншою. Одним із доцільних варіантів, розташування турбіни на рівнинах або гірських перевалах.



Рисунок 2.1 – Наземні ВЕУ

Офшорні ВЕУ встановлюються у відкритому морі або на шельфі, що характеризується високою стабільністю вітрового потоку, але установка і обслуговування таких установок значно складніше (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Офшорні ВЕУ

За типом ротора ВЕУ поділяють на горизонтально-осьові та вертикально-осьові ВЕУ.

Горизонтально-осьові ВЕУ (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines) є найбільш поширеним типом. В таких системах ротор обертається навколо горизонтальної осі і мають високу ефективність при встановленні у сприятливих вітрових умовах (рис. 2.3).

У вертикально-осьових ВЕУ (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines) ротор обертається навколо вертикальної осі. Вони можуть працювати при будь-якому напрямку вітру, але менш ефективні порівняно з горизонтальними. Проте, ці системи простіші в обслуговуванні (рис. 2.3) [15].

За потужністю ВЕУ поділяють на мікротурбіни, малі, середні та великі ВЕУ. Мікротурбіни використовуються для малих приватних будинків, освітлення, зарядки акумуляторів і мають потужність до 1 кВт. Малі ВЕУ підходять для окремих фермерських господарств, віддалених поселень і т.д. і мають потужність від 1 до 100 кВт. Середні ВЕУ використовуються для малих промислових об’єктів. Їх потужність від 100 кВт до 1 МВт. Великі ВЕУ використовуються в комерційних вітропарках, потужністю від 1 МВт і більше.

За кількістю лопатей ВЕУ поділяють на одно-, дво-, три- і багатолопатеві. Однолопатеві практично не використовуються через низьку ефективність та нестабільність. Дволопатеві мають просту конструкцію, але менша ефективність порівняно з трилопатевими. Трилопатеві – це найпоширеніший тип завдяки оптимальному співвідношенню ефективності та стабільності. Багатолопатеві системи застосовуються в низьковітряних умовах (переважно на фермах для насосів).

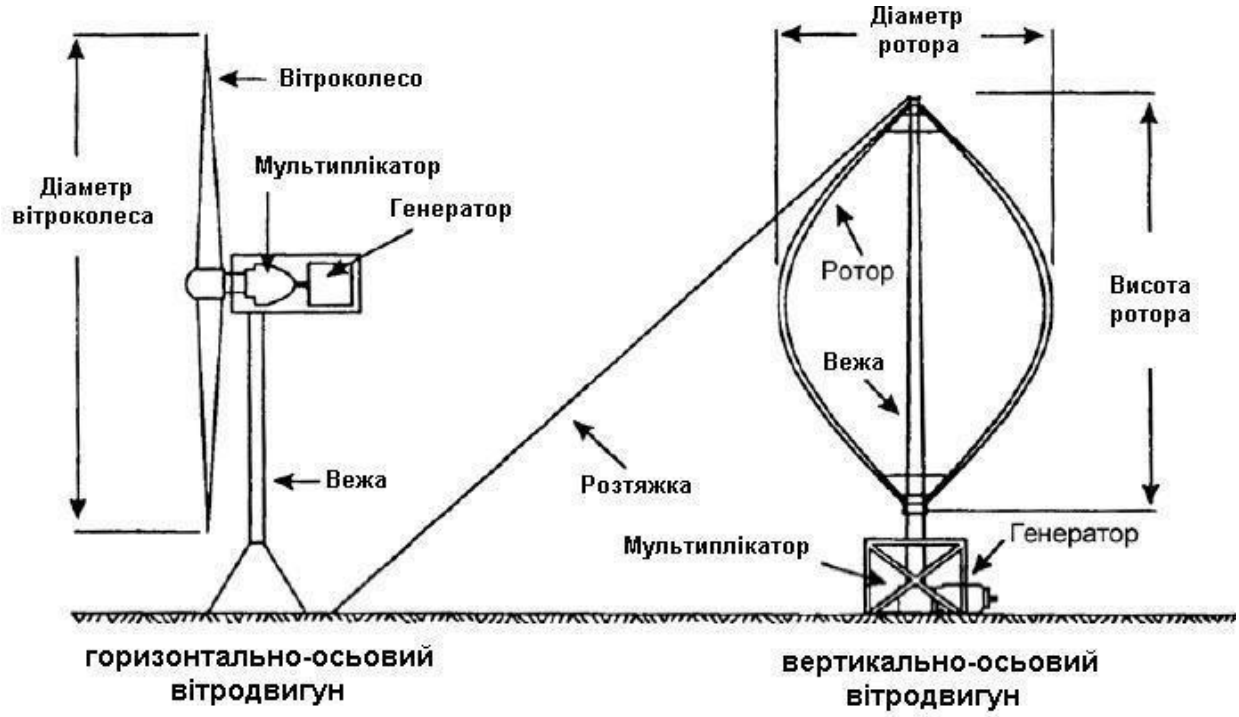


Рисунок 2.3 – Типи ротора ВЕУ

За принципом використання енергії ВЕУ ділять на механічні (де енергія вітру використовується безпосередньо для механічних робіт (помпи, млини) та електричні (перетворюють енергію вітру на електроенергію).

За кількістю турбін у системі ВЕУ поділяють на одиночні установки, які використовуються для локальних потреб і вітропарки, коли система з багатьох турбін для масштабного виробництва енергії.

За швидкістю обертання ротора існують швидкохідні та низькохідні.

За сферою застосування ВЕУ поділяють на промислові, локальні та мобільні. Промислові ВЕУ мають великі турбіни для генерації електроенергії

в енергосистему; локальні забезпечують енергією окремі об’єкти (будинків, підприємств); мобільні – це легкі установки для тимчасового використання.

2.3 Типи використовуваних генераторів і силових перетворювачів

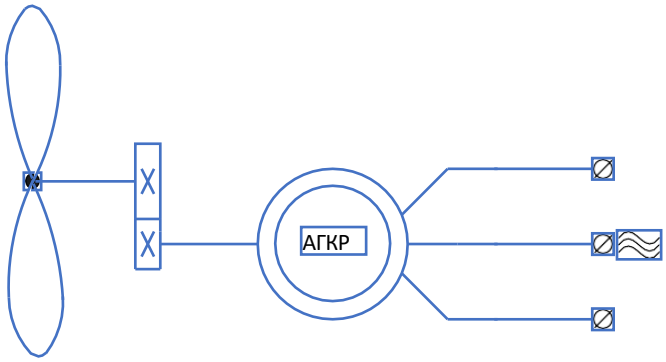
Тип використовуваного генератора і силового перетворювача визначає ефективність ВЕУ, її адаптацію до змін вітрового потоку і можливість інтеграції в електромережу. Найсучасніші системи використовують генератори з постійними магнітами або двообмоткові асинхронні генератори разом із повними перетворювачами потужності для досягнення максимальної ефективності та стабільності.

Для ВЕУ також використовують різні типи силових перетворювачів:

1) постійної частоти. Вони забезпечують стабільну частоту енергії, яка подається в електромережу та володіють простотою, але обмежені у діапазоні робочих умов;
2) змінної частоти. Вони застосовуються для генераторів, які працюють у широкому діапазоні швидкостей вітру і включають перетворювачі типу AC/DC/AC («змінний струм – постійний струм – змінний струм);
3) повний перетворювач потужності. Вони забезпечують повне регулювання параметрів енергії на виході. Їх використовують з генераторами постійної частоти;
4) частотні перетворювачі (VFD - Variable Frequency Drives). Вони дозволяють працювати з генераторами змінної швидкості і мають стабільну вихідну напругу, гнучкість адаптації до мережі.

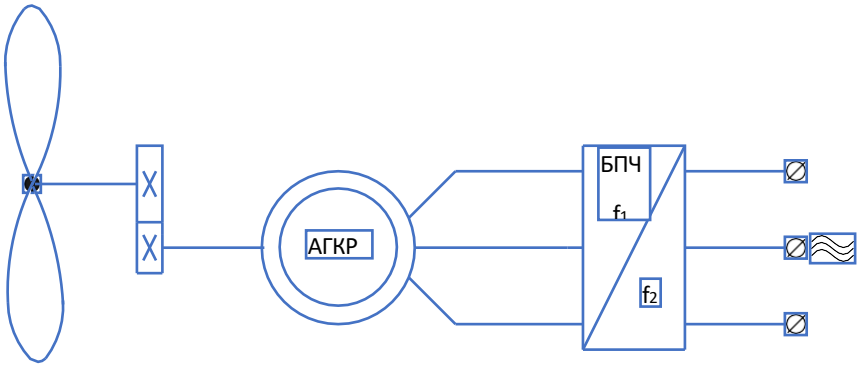
Серед двигунів, на даний час, для ВЕУ використовують асинхронні генератори із короткозамкнутим ротором, генератори постійного струму, синхронні генератори, асинхронний генератор з фазним ротором. Найбільш поширеними є асинхронні генератори із короткозамкнутим ротором [16].

Асинхронний генератор (АГ) безпосередньо підключаються до мережі. Машина віддає електроенергію в мережу з частотою, що рівна частоті мережі, до тих пір, поки її частота обертання перевищує синхронну частоту. Оскільки асинхронна машина потребує менш точної підтримки частоти обертання ВК, а АГ легше входить у синхронізм із мережею, використання АГ із КЗ ротором дозволяє економити на додаткових системах керування (рис. 2.4, а).



а

Якщо до схеми (рис. 2.4, б) додати перетворювач частоти, то отримаємо більш досконалу схему ВЕУ



б

Рисунок 2.4 – ВЕУ із асинхронним генератором:
а – з короткозамкненим ротором; б - з короткозамкненим ротором і перетворювачем частоти

Але використання асинхронної машини для ВЕУ має деякі недоліки. Така система виробляє менше енергії, ніж, наприклад, синхронна машина при

одному і тому ж вітровому режимі. Вона працює з меншим коефіцієнтом потужності через великі струми намагнічення, які приблизно пропорційні квадрату напруги, що означає, що вона споживає реактивну потужність індуктивного характеру з мережі, що вимагає використання компенсуючих пристроїв. Наявність мультиплікатора зменшує ефективність системи.

Як вже зазначалося вище, для ВЕУ використовують і синхронні генератори (СГ). Схема підключення ВЕУ із безпосереднім підключенням синхронних генераторів до мережі аналогічне до АГ з корокозамкненим ротором, показаний на рисунку 2.4 а, тому немає сенсу наводити цю схему окремо [17].

Як правило, потужність енергосистеми набагато більш потужна, ніж ВЕУ, тому генератор буде знаходитися в синхронізмі в широкому діапазоні зміни потужності, що розвивається ВД. Синхронні генератори мають можливість генерувати та керувати як активною, так і реактивною потужністю, 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 при паралельній роботі з іншими агрегатами; і дуже ймовірно, що вона вийде з синхронізму під час сильних поривів вітру. Процес синхронізації машини та її підключення до енергосистеми також складний.

Використання безпосереднього перетворювача частоти, включеного між синхронним генератором та енергетичною системою дозволяє ці недоліки суттєво усунути. Проте, така система має певні обмеження по керуванню ВЕУ, зокрема за швидкістю обертання і моментом. Такж її недоліком є застосування мультиплікатора, що узгоджує частоту обертання колеса із генератором. Схематично підключення синхронного генератора до мережі із застосуванням безпосереднього перетворювача частоти подібне до схеми, зображеної на рисунку 2.4 б, тому окремо не наводиться.

ВЕУ із застосуванням синхронного генератора та перетворювача частоти з кількох ланок має значно кращі регулювальні можливості. ВЕУ на основі синхронних генераторів із додаванням перетворювачів є одним із таких варіантів структури. Статор синхронного генератора має трифазну обмотку, а його ротор може містити постійні магніти або обмотку збудження. Структура типового ВЕУ з синхронним генератором з обмоткою збудження показана на рисунку 2.5. Такий пристрій підключений до мережі через силовий перетворювач частоти. У цій системі можна контролювати коефіцієнт потужності, і використання сучасних перетворювачів частоти із високим ККД робить її ефективною.

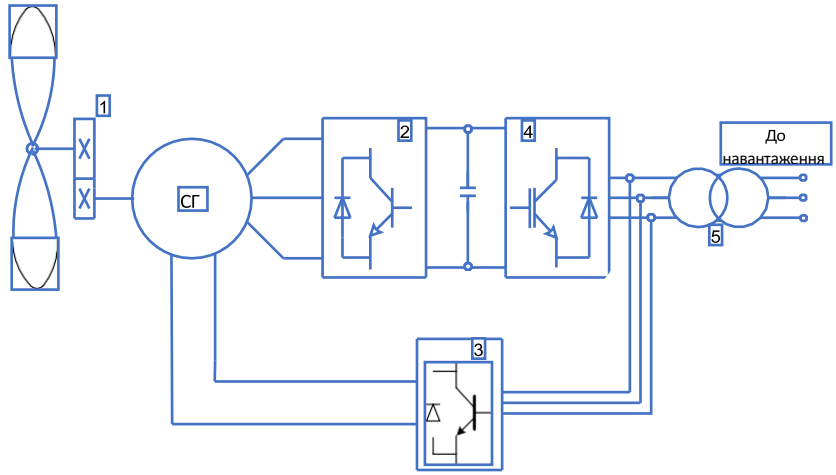


Рисунок 2.5 – Конфігурація вітрової енергетичної установки із використанням синхронного генератора:
1 – редуктор; 2, 3 – випрямлячі; 4 – інвертор; 5 – трансформатор

На рисунку вітрове колесо (ВК) підключено до варіатора або редуктора, а синхронний генератор підключений до мережі за допомогою двох випрямлячів. Ці випрямлячі працюють на основі широтно-імпульсної модуляції. Одне з них підключено до обмотки статора, що випрямляє напругу для інвертора, а потім передає напругу у мережу через трансформатор, який також має можливість змінювати момент генератора. Інший контролює випрямляча, який забезпечує живлення обмотки збудження синхронного

генератора. Тим не менш, така система вимагає використання редуктора, що знижує ККД системи, а також синхронного генератора, розміри якого можуть бути досить значними. Як наслідок, система є громіздкою.

Підключення ВЕУ до мережі за допомогою синхронного генератора на постійних магніта показано на рисунку 2.6. Перевагою цього варіанту є те, що він простий у конструкції та не містить контактних кілець. Діодний випрямляч 2, ШІМ-перетворювач 3 і інвертор 4 підключають обмотку статора генератора до мережі. Діодний випрямляч випрямляє змінну напругу, зняту зі статора генератора, тоді як ШІМ-перетворювач регулює момент обертання вітротурбіни, щоб максимізувати потужність конденсатора. Інвертор не тільки керує коефіцієнтом потужності, але й перетворює постійну напругу у змінну та передає її в мережу [16].

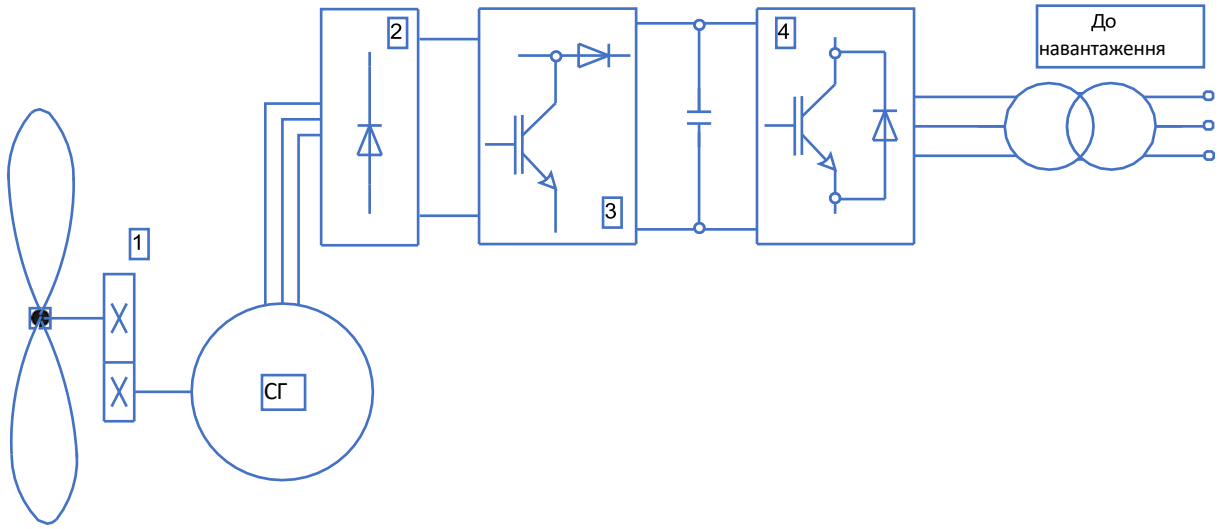


Рисунок 2.6 – Структурна схема ВЕУ із використанням синхронного генератора на постійних магнітах

Як і в попередній системі, недоліком цієї системи є використання редуктора для підвищення частоти обертання вала, необхідного для синхронного генератора. Наявність редуктора зменшує ККД ВЕУ. У синхронному генераторі постійні магніти не тільки дорогі, але й можуть втрачати свої магнітні властивості. Масогабаритні характеристики цього

генератора дуже великі, тому він може працювати в місцях з невеликою потужністю. Немає можливості прямо регулювати вихідну напругу.

Крім того, використовуються асинхронні генератори із подвійним живленням. Через їхні певні переваги асинхронні двигуни з фазним ротором можуть бути використані для ВЕУ. Основною перевагою асинхронного генератора з фазним ротором є те, що він може забезпечити постійну частоту напруги на виході, незважаючи на зміну частоти обертання ротора в певних межах. Схеми, які використовують генератор подвійного живлення, включають асинхронізований синхронный генератор (АСГ) і надсинхронний вентильний каскад (НВК).

Схему асинхронізованого синхронного генератора з використанням в обмотці ротора безпосереднього перетворювача частоти (БПЧ) наведено на рисунку 2.7. Крім того, обмотка статора безпосередньо підключена до енергетичної системи [16].

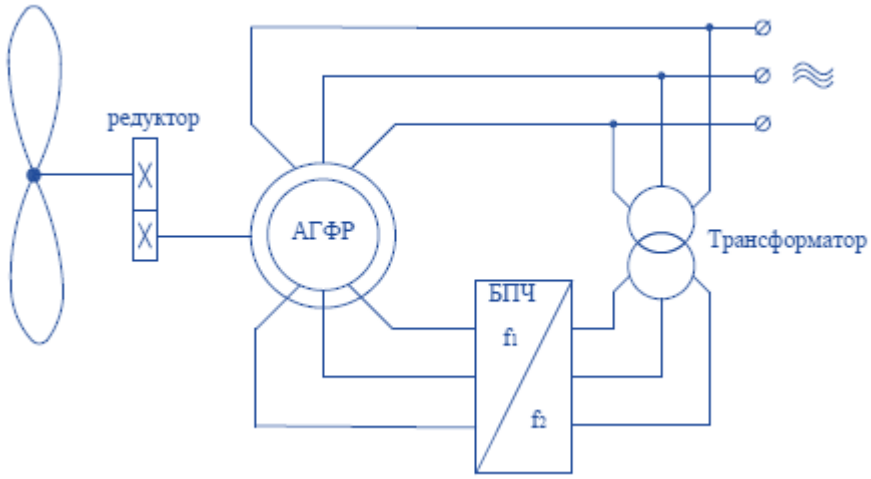


Рисунок 2.7 – Схема ВЕУ з АСГ із живленням ротора через перетворювач частоти

ВЕУ на основі асинхронізованого синхронного генератора може працювати як у надсинхронному, так і в підсинхронному режимах, але діаметр цих машин має бути достатньо великим, щоб забезпечити достатню потужність. У результаті, використання серійних асинхронних двигунів з

фазним ротором обмежене. Крім того, небажано, щоб серійна машина працювала в режимах, віддалених від номінального.

Спрощена схема ВЕУ з використанням надсинхронного вентильного каскаду показана на рисуноку 2.8. Обмотка статора підключена до енергетичної системи, а обмотка ротора підключена до входу трифазного випрямляча. Інвертор, що ведений мережею (ІВМ) з'єднаний до випрямляча. У цьому випадку потужність знімається як зі статора, так і з ротора. Це збільшує коефіцієнт використання машини та розширює можливості керування [16].

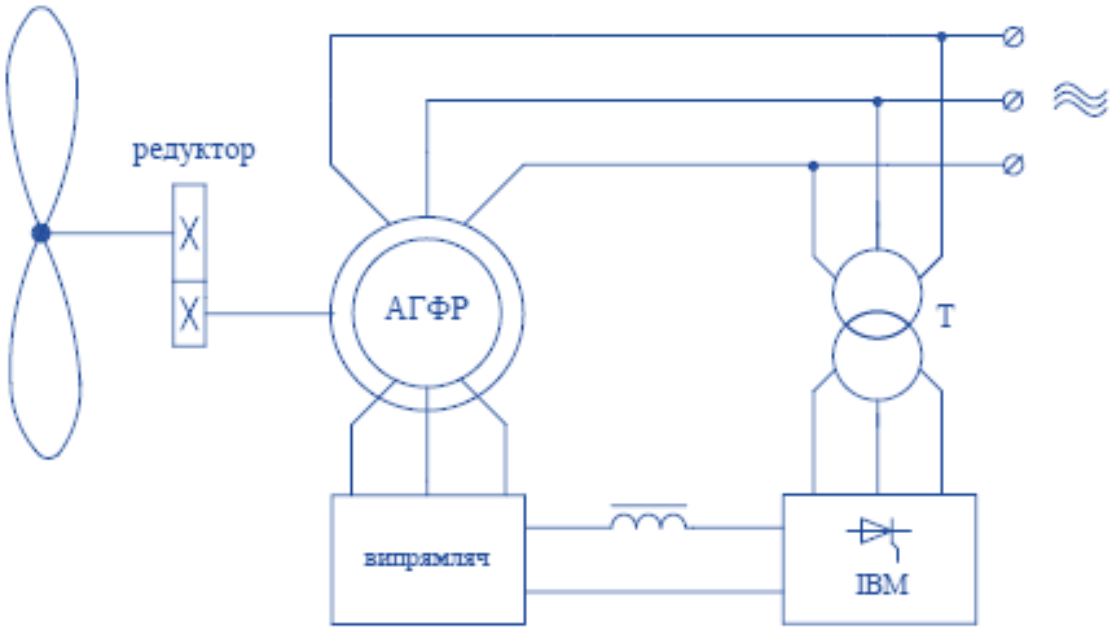


Рисунок 2.8 – Схема ВЕУ із використанням синхронного вентильного каскаду

Крім недоліків, описаних для асинхронізованого синхронного генератора, ця система має ще один недолік: генерація активної потужності можлива лише при надсинхронній швидкості обертання. Це означає, що підсинхронний режим неможливий, оскільки випрямляч в колі ротора може передавати активну потужність лише від роторної обмотки на перетворювач частоти, а не навпаки. Це означає, що або висока швидкість обертання ВК, або використання мультиплікатора, що знизить загальний ККД системи.

2.4 Конструктивні особливості та принцип дії вітрових генераторів

Вітровий генератор є ключовим компонентом вітроенергетичної установки (ВЕУ), який перетворює кінетичну енергію вітру в електричну енергію. Основні конструктивні вітроенергетичної установки має такі елементи, як вежа (щогла), ротор, гондола (корпус генератора), редуктор, генератор, система контролю та захисту, силові перетворювачі.

Вежа (щогла) забезпечує підняття вітрового генератора на певну висоту, де швидкість і стабільність вітру є вищими. Вежі (щогли) виготовляється із сталі або залізобетону. Як правило, висота веж становить від 30 до 150 метрів залежно від потужності генератора. Ротор складається з лопатей і втулки, до якої вони кріпляться. Лопаті уловлюють енергію вітру й передають механічну енергію на вал. Матеріали лопатей – скловолокно, вуглецеве волокно або композитні матеріали.

Гондола (корпус генератора) містить основні робочі вузли генератора, а саме головний вал, редуктор, генератор, систему охолодження та контролю. Гондола кріпиться до вежі й обертається у напрямку вітру завдяки системі орієнтації (yaw system).

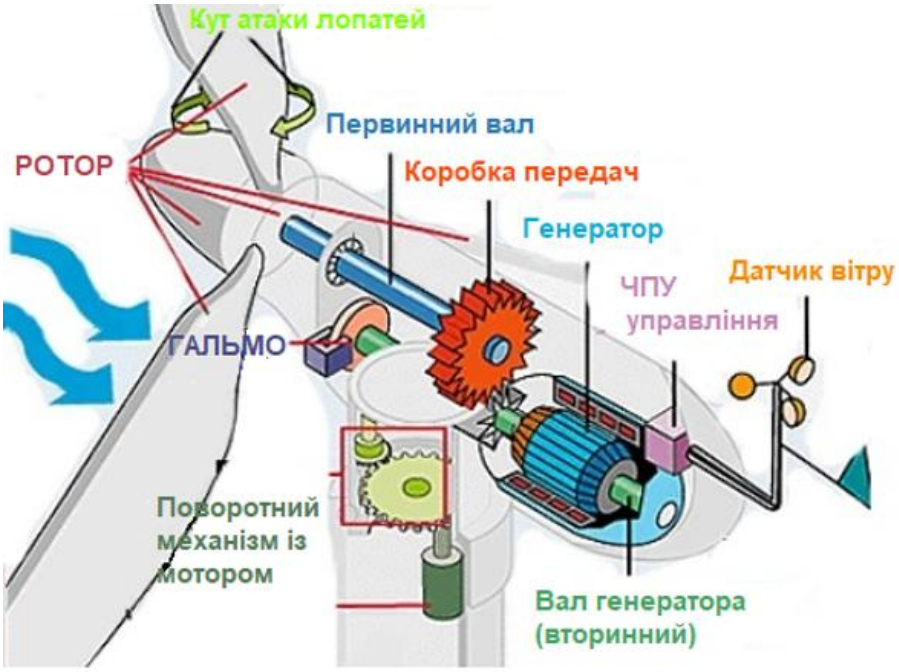
Редуктор підвищує швидкість обертання валу, що надходить від ротора, до рівня, необхідного для генератора. В деяких конструкціях (наприклад, безредукторні генератори) редуктор відсутній, що знижує втрати енергії.

Генератори – описані у попередньому підрозділі.

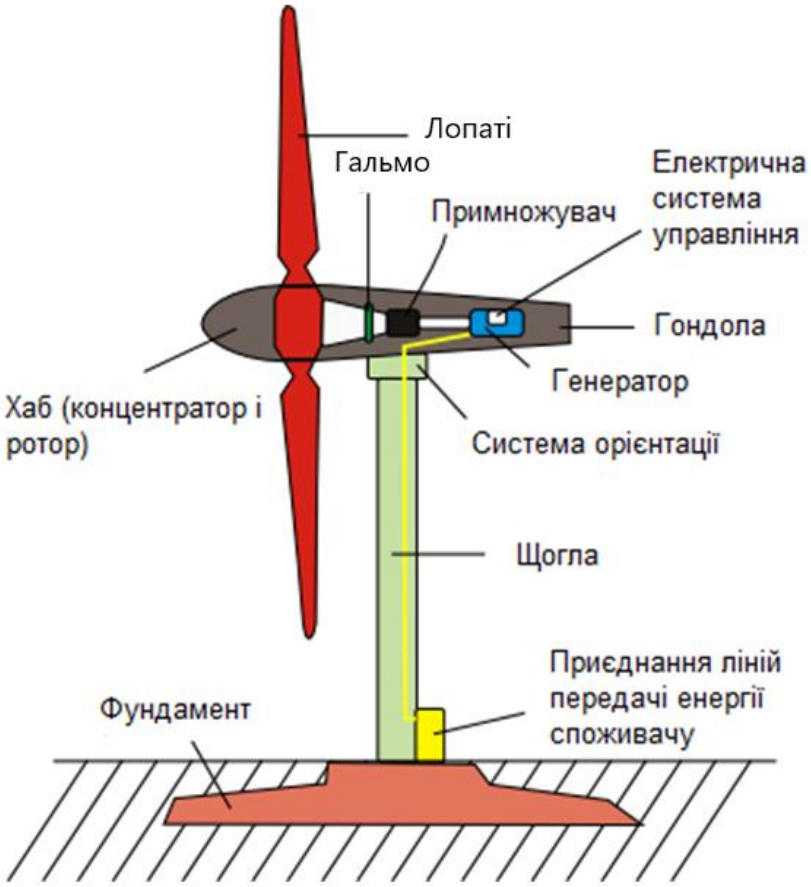
Система контролю та захисту моніторить швидкість вітру, напрямок та роботу генератора. Дана система включає автоматичну систему відключення при надмірно сильному вітрі для захисту обладнання.

Силові перетворювачі перетворюють електричну енергію з генератора у стабільну напругу та частоту для передачі в електромережу.

Спрощена конструкція вітрогенератора показано на рисунку 2.9 [17].



а



б

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

Принцип роботи вітрового генератора базується на перетворенні кінетичної енергії вітру в механічну енергію, а потім у електричну енергію. Лопаті ротора обертаються під дією сили вітру. Обертання лопатей залежить від їхньої аеродинамічної форми та швидкості вітрового потоку. Механічна енергія від обертання лопатей передається через головний вал до редуктора. У безредукторних системах вал безпосередньо з'єднаний із генератором. Генератор (синхронний або асинхронний) перетворює механічну енергію обертання в електричну енергію. В генераторах із постійними магнітами енергія створюється шляхом обертання ротора в магнітному полі. Силові перетворювачі стабілізують параметри електричного струму (напругу та частоту), щоб енергія відповідала стандартам електромережі. Згенерована електроенергія передається у локальну або загальну електромережу для подальшого використання. Установка має спеціальну систему гальмування, щоб запобігти несправності під високим тиском повітря. Коли швидкість вітру перевищує 50 км/год, гальма автоматично зупиняють обертання ротора. Гальмівна система повністю зупиняє лопаті, коли швидкість повітря сягає 80 км/год. Усі частини турбіни розроблені таким чином, щоб максимально використовувати повітряну енергію.

У сучасних ВЕУ все частіше використовують безредукторні генератори. Вони мають менші втрати енергії на передачу та підвищену надійність через відсутність механічного зносу редуктора. Але такі системи мають вищу вартість через складність конструкції генератора.

Схема роботи вітрового генератора: кінетична енергія вітру → обертання лопатей → механічна енергія валу → генератор → електрична енергія → силовий перетворювач → електромережа.

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 ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

3.1 Основні можливі напрями підвищення ефективності вітроенергетичних установок

Покращення ефективності вітроенергетичних установок (ВЕУ) є актуальним завданням для підвищення продуктивності й економічної доцільності відновлюваної енергетики. Оптимізація роботи ВЕУ стосується як технічних, так і управлінських рішень.

Основними можливими напрямами підвищення ефективності вітроенергетичних установок можуть бути такі:

- оптимізація аеродинамічних характеристик лопатей;
- застосування інтелектуальних систем керування;
- використання генераторів нового покоління;
- оптимізація розташування ВЕУ;
- інтеграція систем накопичення енергії;
- покращення технічного обслуговування;
- зменшення втрат у силових перетворювачах;
- адаптація до мінливих вітрових умов.

Розглянемо ці напрямки.

Оптимізація аеродинамічних характеристик лопатей.

Даний напрям може мати декілька піднапрямків, а саме використання сучасних матеріалів і удосконалення профілю лопатей. Використання сучасних матеріалів таких як композитні матеріали зі скловолокна, вуглецевого волокна або полімерів. Такі матеріали забезпечують легкість, міцність і стійкість до втомлених навантажень.

Оптимізація аеродинамічного профілю лопатей дозволяє максимально ефективно уловлювати енергію вітру. А використання адаптивних лопатей із можливістю зміни кута атаки (pitch control) для мінімізації втрат при змінному

вітровому потоці. Додавання стабілізаторів на кінцях лопатей (winglets) знижує турбулентні втрати.

Застосування інтелектуальних систем керування. Системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) дозволяє проводити моніторинг і аналіз даних у реальному часі для виявлення неефективностей; оптимізація режимів роботи ВЕУ залежно від вітрових умов.

Автоматичне регулювання кута нахилу лопатей (Pitch Control) дозволяє адаптувати роботу турбіни до швидкості та напрямку вітру, підтримуючи стабільну вихідну потужність.

Система орієнтації гондоли (Yaw System) автоматично орієнтує ротор у напрямку вітру для досягнення максимальної ефективності.

Використання генераторів нового покоління. Безредукторні генератори (Direct Drive) знижують механічні втрати та підвищує надійність, забезпечують кращу ефективність у низьковітряних умовах. Двообмоткові асинхронні генератори (DFIG) дозволяють працювати в широкому діапазоні швидкостей вітру. Генератори з постійними магнітами (PMSG) забезпечують високий ККД завдяки відсутності втрат на збудження.

Оптимізація розташування ВЕУ. Розміщення ВЕУ в регіонах із високою середньорічною швидкістю вітру (5…12 м/с). Використання географічного аналізу для обрання ділянок із мінімальними перешкодами (гори, будівлі).

Мікрооптимізація в межах вітропарку передбачає визначення оптимальної відстані між турбінами для зниження ефекту «затінення» (вплив турбулентності від сусідніх ВЕУ).

Інтеграція систем накопичення енергії дозволяє акумулювати енергію та збалансувати виробництво енергії у періоди пікової та мінімальної вітрової активності та поліпшують стабільність енергопостачання.

Гібридні системи поєднують ВЕУ із сонячними електростанціями або іншими джерелами енергії для забезпечення безперебійної роботи.

Покращення технічного обслуговування передбачає регулярний моніторинг стану обладнання. Наприклад, доцільно застосовувати датчики вібрації, температури та напруги для раннього виявлення несправностей.

Використання предиктивного обслуговування дозволяє аналізувати з даних за допомогою штучного інтелекту для прогнозування технічного стану компонентів ВЕУ.

Використання сучасних перетворювачів енергії на основі IGBT або SiC-транзисторів дозволяють мінімізувати втрати та підвищити ефективність. Оптимізація режимів роботи для узгодження вихідної частоти з електромережею.

Адаптація до мінливих вітрових умов. Впровадження змінної швидкості обертання ротора забезпечує кращу енерговіддачу при нестабільному вітровому потоці. Системи контролю турбулентності зменшують вплив нерівномірного вітрового потоку на роботу турбіни.

Отже, покращення ефективності роботи вітроенергетичних установок вимагає комплексного підходу, що включає оптимізацію конструкції, застосування сучасних систем керування, інтеграцію накопичувачів енергії та використання новітніх матеріалів і технологій. Постійний розвиток у цих напрямках дозволяє підвищити продуктивність ВЕУ, зменшити витрати на обслуговування та максимально ефективно використовувати енергію вітру.

3.2 Енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

Вітрова енергетика є одним із найперспективніших напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні. Завдяки сприятливим природно-кліматичним умовам та стратегічному географічному розташуванню країна має значний енергетичний потенціал для використання вітрової енергії.

Загальний потенціал вітрової енергії в Україні. Теоретичний потенціал оцінюється на рівні 3000…5000 МВт встановленої потужності. Технічний

потенціал (з урахуванням обмежень інфраструктури, рельєфу та густоти населення) становить близько 90 ТВт·год/рік. Потенціал економічно доцільної генерації на сьогодні складає до 30 ТВт·год/рік, що може забезпечити близько 10…12 % загального енергоспоживання країни (рис. 3.1) [6].

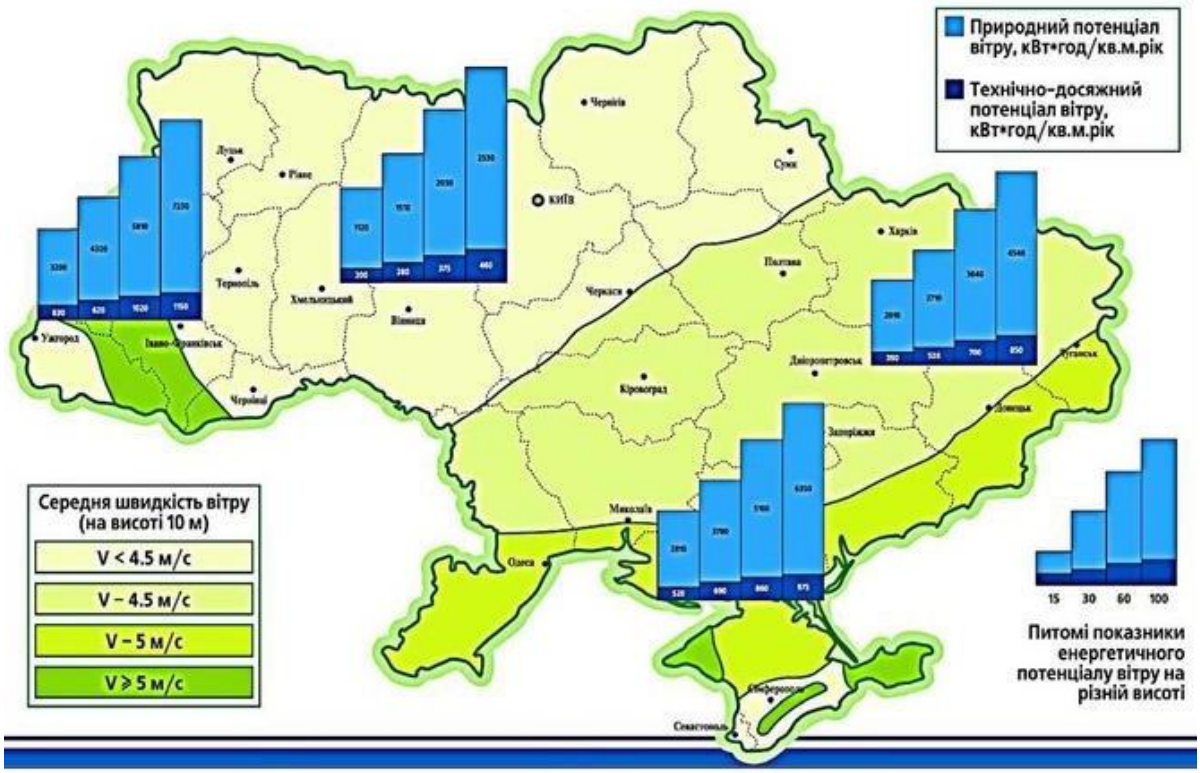


Рисунок 3.1 – Питомий енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

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

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.

Значний потенціал завдяки відкритим просторам і сталим вітровим потокам.

3) Карпатський регіон:

- 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 регіонів завдяки стабільним вітровим умовам, але після захоплення півострова країною-терористом – росією, дане питання відкладено до часу, коли Крим буде звільнено від російської окупації.

Загальна встановлена потужність вітрових електростанцій на 2023 рік в Україні становить близько 1700 МВт. Основними проєктами є великі ВЕС, що працюють на півдні країни, зокрема:

- ВЕС Приморська (Запорізька область) – 200 МВт;
- очаківська ВЕС (Миколаївська область) – 100 МВт.

Значна частина вітрових установок побудована за підтримки «зеленого тарифу», що стимулює інвесторів до розвитку цієї галузі.

Перспективи розвитку. Приваблення міжнародних інвесторів через державні програми підтримки ВДЕ. Модернізація енергетичної інфраструктури передбачає розвиток електричних мереж для інтеграції енергії з ВЕС.

Впровадження сучасних технологій, наприклад шляхом будівництва офшорних вітрових станцій у Чорному та Азовському морях.

Також перспективним є розвиток локальної генерації, зокрема установлення малих вітрових електростанцій для приватних домогосподарств і підприємств.

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

Виклики для розвитку вітрової енергетики в Україні.

Нажаль, на даний момент чимало перспективних територій для будівництва ВЕС знаходяться під окупацією рашистів.

Високі витрати на будівництво та технічне обслуговування вітрових установок значно обмежують розповсюдження вітрової енергетики.

Таким чином, Україна володіє значним енергетичним потенціалом вітрової енергії, особливо в південних та карпатських регіонах. Завдяки розвитку інфраструктури, впровадженню сучасних технологій та залученню інвестицій можливе значне збільшення частки вітрової енергетики у національному енергобалансі. Це сприятиме зміцненню енергетичної незалежності країни та зниженню екологічного навантаження.

3.3 Покращення системи керування вітроенергетичної установки

Важливо, щоб системи, які використовують відновлювальні джерела енергії, особливо вітроенергетичні установки, вирівнювали рівні та різноманітні типи напруг між собою. Це особливо важливо для установок, які працюють при змінних частотах обертання, коли амплітуда змінної напруги та частота змінюються. Згідно з практикою, такі установки є найбільш ефективними. Це відрізняє їх від інших алгоритмів, таких як використання редукторів, перемикання обмоток тощо. Це досягається за допомогою різноманітних технічних пристроїв, які можна візуально представити у вигляді структурної схеми. Структурна схема дозволяє візуально показати взаємозв'язок і вирівнювання пристроїв, вибрати необхідні пристрої та визначити, які саме пристрої системи управління повинна контролювати.

Установка вітроенергетики використовує синхронну машину із збудженням від постійних магнітів як генератори. Створення синхронних генераторів з використанням магнітом'яких матеріалів дозволяє підвищити ККД. Зменшення реактивного моменту генератора є ще однією перевагою; це зменшує пульсації реактивного моменту, а отже, шум і вібрації.

Використовуючи відновлювальні джерела енергії, автономні системи використовують накопичувачі електроенергії. Це дозволяє передавати енергію споживачу навіть у ситуаціях, коли генерації немає. З іншого боку, енергія буде накопичуватися під час пікової генерації. Зазвичай накопичувальні пристрої є акумуляторами.

Особливості генератора, призначений для використання в вітроенергоустановках, включають наступне: нестаціонарність сили вітру та швидкості за досить короткий проміжок часу; значні динамічні моменти на валу генератора та вітротурбіни; відсутність мультиплікатора як механічної ланки, яка може демпфувати осьові зусилля на валу; постійно діючі перехідні процеси та пов'язані з ними струми, електродинамічні сили (рис. 3.2 – 3.4) [17].

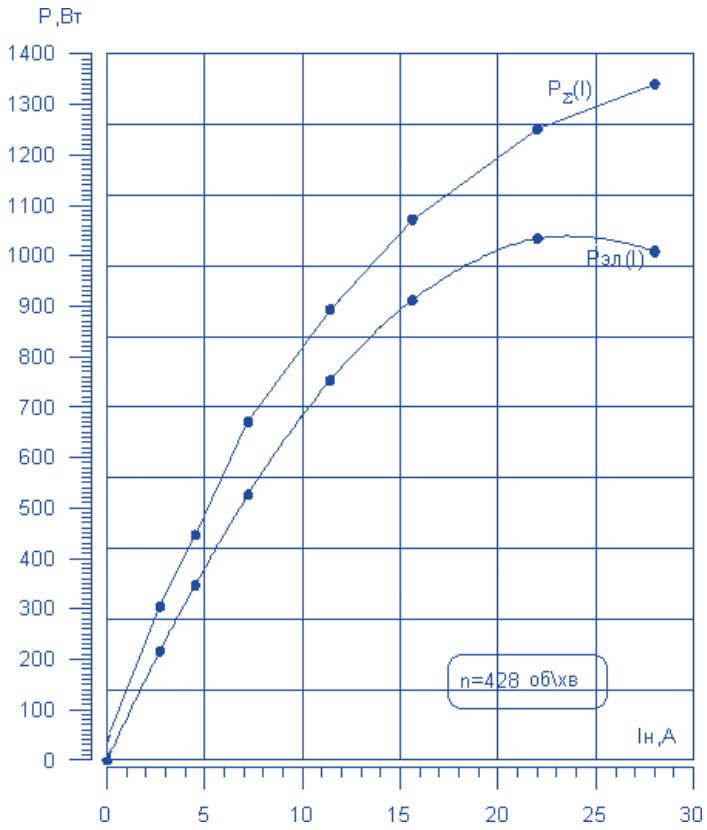


Рисунок 3.2 – Характеристика потужності генератора

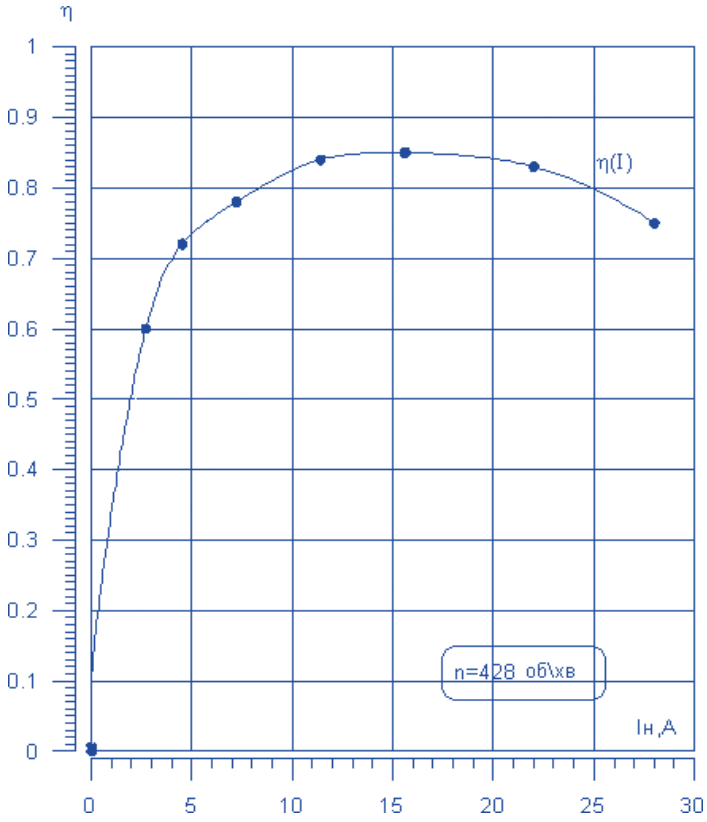


Рисунок 3.3 – Характеристика зміни ККД генератора залежно від навантаження

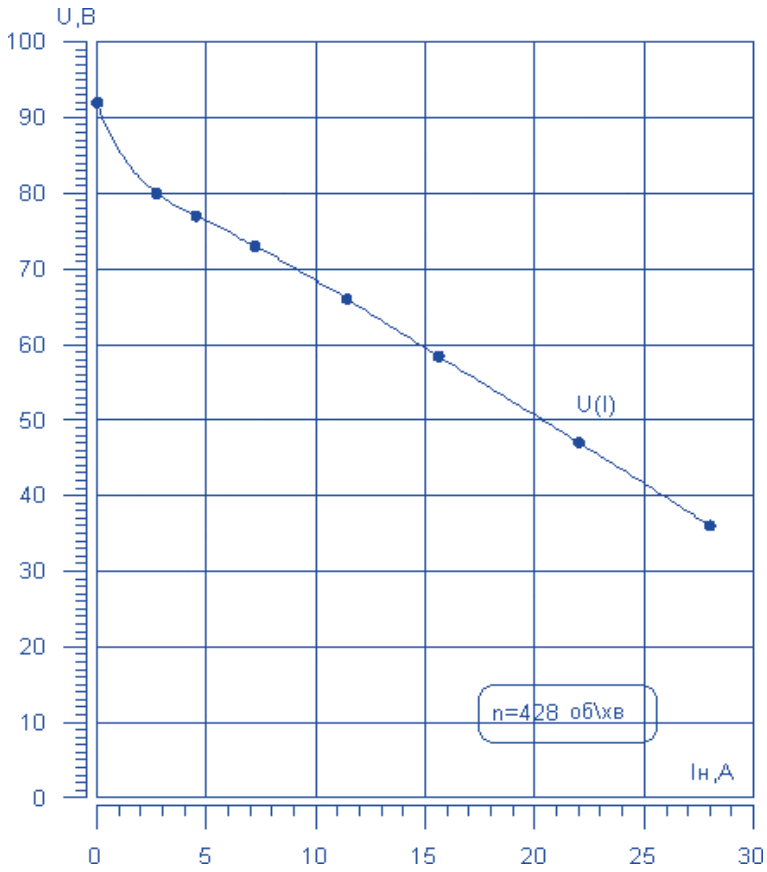


Рисунок 3.4 – Зовнішні характеристики генератора

Вітроенергетична характеристика вітроколеса наведена на рисунку 3.5.

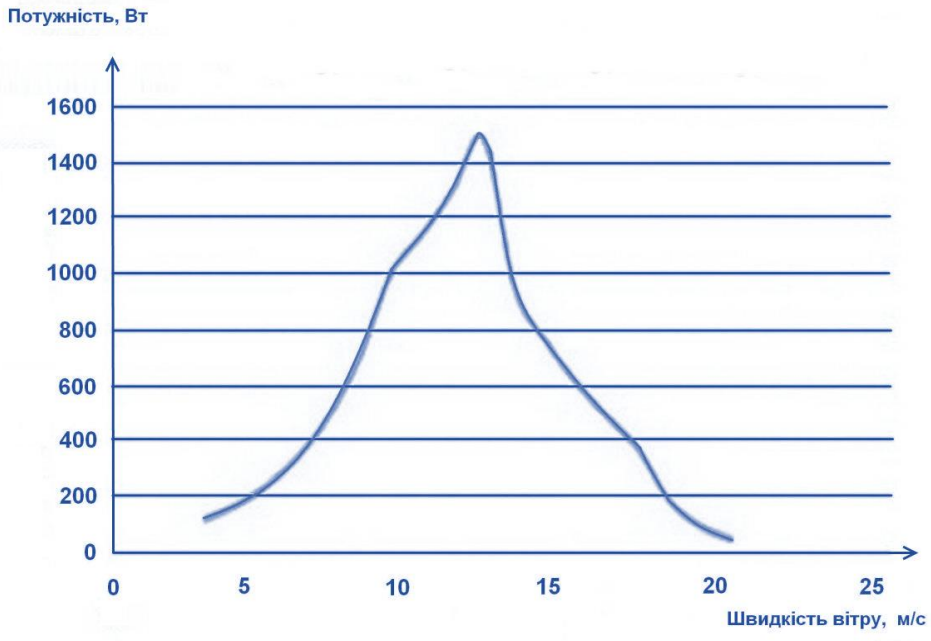


Рисунок 3.5 – Вітроенергетична характеристика вітроколеса

Структурна схема електропостачання споживача від вітрогенератора показана на рисунку 3.6 [18].

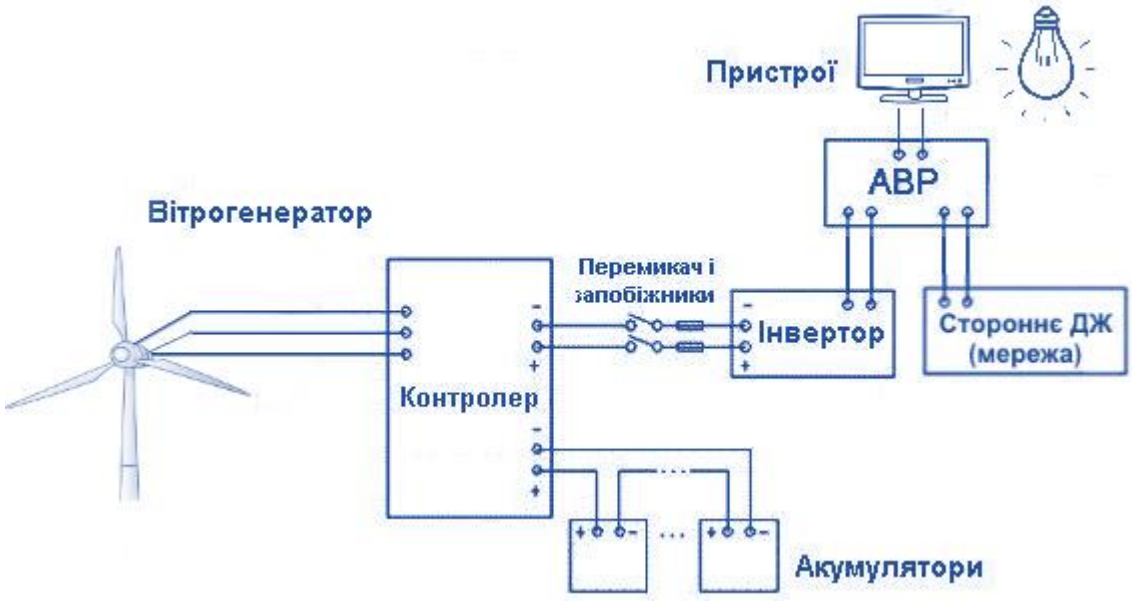


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи керування вітрової енергоустановки

На основі структурної схеми була розроблена функціональна схема системи керування ВЕУ (рис. 3.7).

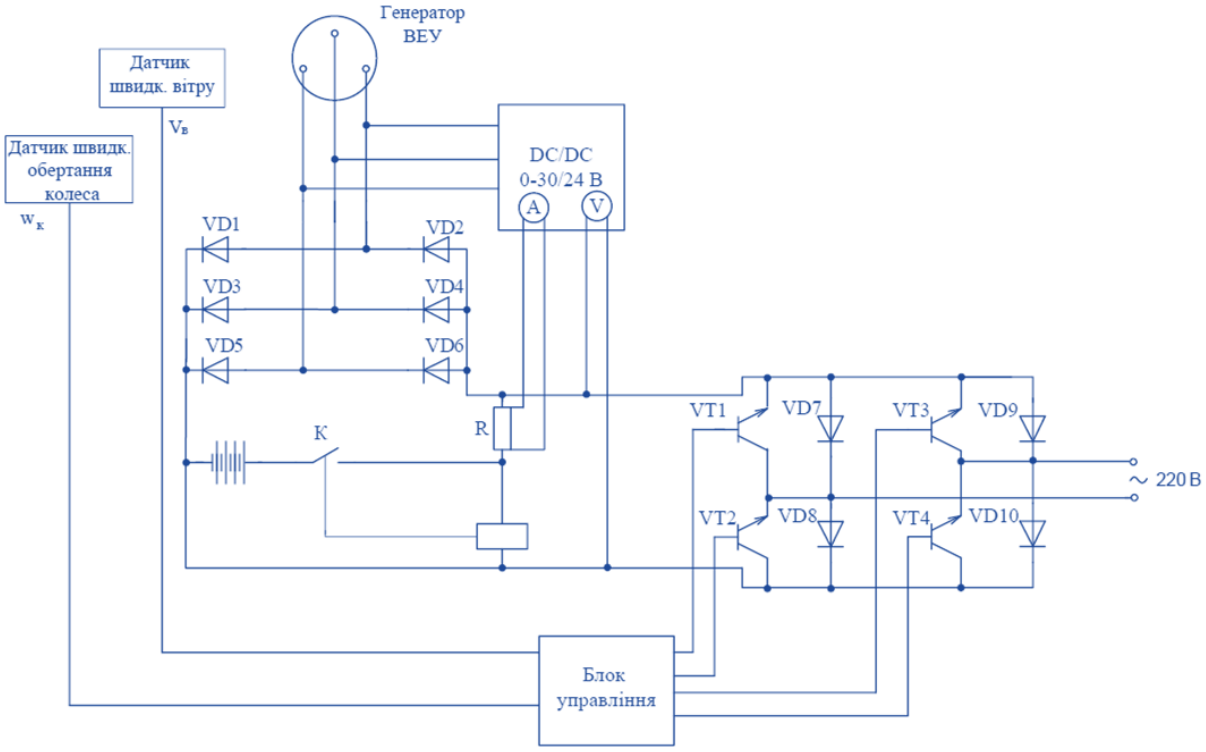


Рисунок 3.7 – Функціональна схема керування електроприводом ВЕУ

Данна схема гарантує, що споживач отримує достатню кількість електроенергії. Якщо в акумуляторних батереях не вистачає енергії, автоматичний регулятор напруги (АВР) перемикає систему з основного джерела на резервний.

При відсутності електроенергії бензогенератор може служити резервним джерелом живлення, або сам вітровий електротехнічний комплекс може служити резервним джерелом живлення, якщо є централізоване електропостачання. Коефіцієнт потужності ВЕУ залежить від швидкохідності.

При роботі ВЕУ колеса оптимізація роботи в точці відбору максимальної потужності є важливою. Як показано на діаграмах, коефіцієнт потужності вітрового колеса зменшується зі збільшенням швидкості обертання, коли він досягає максимального відбору потужності.

Розглянемо ідею системи управління ВЕУ з окремим навантаженням. У цьому випадку важливо регулювати струм заряду акумулятора, щоб підтримувати ідеальну швидкість обертання вітрового колеса та максимальну потужність, що відбирається. Зміна струму заряду акумулятора змінить момент навантаження вітрового колеса. Швидкість обертання буде оптимізована відповідно до поточної швидкості вітру. Такий метод дозволяє автоматично утримувати кутову швидкість обертання вітроколеса, змінюючи момент навантаження ВЕУ і стабілізуючи швидкість за рахунок збільшення струму заряду та струму навантаження (рис. 3.8) [19].

Система надає можливість змінювати момент обертання вітроенергетичної установки, що дозволяє оптимізувати її роботу. Іншими словами, система прагне досягти оптимальної точки MPPT (Maximum Power Point Tracking), тобто досягти максимальної можливої електричної потужності на виході схеми за рахунок змінної швидкості обертання вітроколеса.

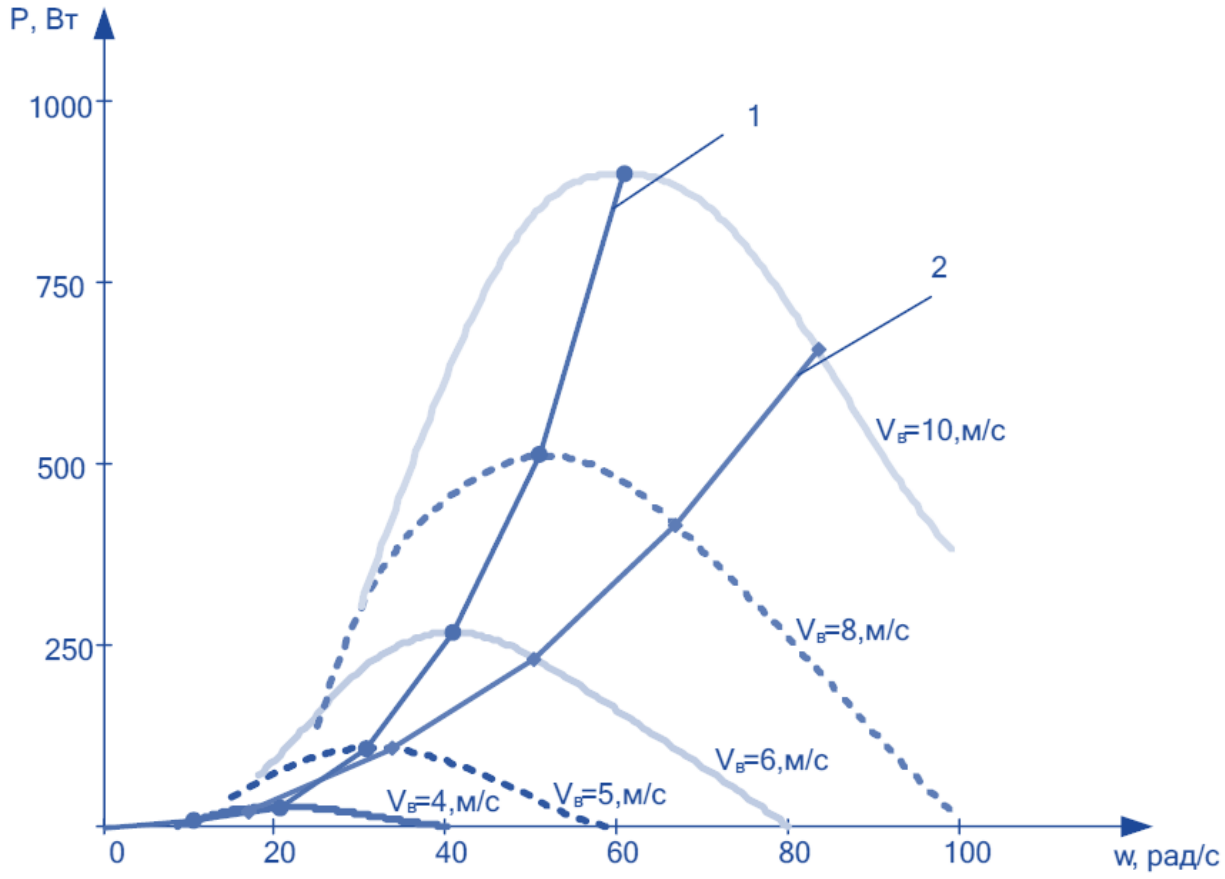


Рисунок 3.8 – Криві потужностей вітрової турбіни при її роботі із регулюванням (1) та без регулювання (2)

З рисунка 3.8 видно, що ВЕУ не використовує свій потенціал повністю без регулювання. На низьких швидкостях вітру турбіна перевантажена, а на високих швидкостях вітру вона недовантажена. Іншими словами, ВЕУ працює на кутовій швидкості колеса, яка відрізняється від ідеальної та рухається в ту чи іншу сторону.

3.4 Моделювання системи ВЕУ

Моделювання вітроенергетичної установки (ВЕУ) є важливим етапом проєктування та оптимізації її роботи для досягнення максимальної ефективності. Це дозволяє досліджувати роботу системи в різних умовах,

аналізувати вплив вхідних параметрів та оптимізувати конструкцію й керування.

Метою та завданням моделювання ВЕУ є:

- оцінка ефективності роботи ВЕУ у різних кліматичних умовах;
- розрахунок енергетичних характеристик: вироблення потужності, коефіцієнта корисної дії (ККД), впливу вітрових умов;
- оптимізація конструкції лопатей та генератора;
- вибір оптимальних параметрів керування: орієнтація лопатей, регулювання обертів генератора;
- інтеграція ВЕУ в електромережу та аналіз стабільності живлення.

Розглянемо основні компоненти моделювання ВЕУ.

1) Модель вітрового потоку.

Швидкість та напрямок вітру описуються за допомогою математичних розподілів, таких як розподіл Вейбулла [18 – 20]:

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

де

v – швидкість вітру,

c – масштабний параметр,

k – коефіцієнт форми.

2) Аеродинамічна модель лопатей.

Використовують методи аеродинаміки для обчислення сили вітру на лопаті та моменту обертання:

$$P_в = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p$$

де:

ρ – щільність повітря,

A – площа обертання лопатей,

v – швидкість вітру,

C_p – коефіцієнт потужності.

3) Механічна модель передачі енергії включає передачу енергії від ротора через вал і редуктор до генератора. Враховуються втрати в редукторі та на тертя у підшипниках.
4) Модель електричного генератора:

- синхронний, асинхронний або генератор з постійними магнітами (PMSG);
- енергетичний вихід генератора визначається залежно від швидкості обертання та опору навантаження.

5) Система керування ВЕУ.

Моделювання систем включає регулювання кута атаки (Pitch control) та регулювання обертів генератора (Yaw control). Використання ПІД-регуляторів для стабільної роботи системи.

6) Інтеграція в електричну мережу: моделювання силових перетворювачів та системи передачі енергії.

Для моделювання ВЕУ застосовують програмне забезпечення та математичні інструменти, зокрема:

- MATLAB/Simulink: використовується для створення аеродинамічних, електричних та динамічних моделей;
- ANSYS Fluent: моделювання аеродинамічних характеристик лопатей;
- SCADA-системи: реальний моніторинг і аналіз даних;
- Bladed та OpenFAST: спеціалізоване ПЗ для проєктування та аналізу вітроенергетичних установок.

Модель оптимізації роботи ВЕУ. Для підвищення ефективності системи використовують математичні оптимізаційні алгоритми, такі як:

- метод Монте-Карло – для аналізу вітрових умов і параметрів;
- генетичні алгоритми – оптимізація форми лопатей та параметрів генератора;
- методи машинного навчання – для прогнозування потужності та керування ВЕУ.

Наведемо приклад розрахунку основних характеристик ВЕУ.

Визначаємо потужність ВЕУ:

$$P_в = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p$$

При ρ = 1.225 кг/м^3, A = 314 м^2, v = 10 м/с, $C_р$ = 0.4.

$$P_в = \frac{1}{2} 1,225 \cdot 314 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \approx 770 \text{ кВт}$$

Отже, моделювання вітроенергетичних установок є важливим інструментом для оцінки їхньої продуктивності та підвищення ефективності. Сучасні методи, зокрема аеродинамічні моделі, оптимізаційні алгоритми та системи керування, дозволяють удосконалювати конструкцію ВЕУ, забезпечуючи максимальну енерговіддачу при мінімальних втратах.

Виконаємо для прикладу моделювання системи, імітуючи подачу на вхід швидкості обертання вітрового колеса та регулюючий вплив на випрямляч, який подає живлення акумуляторній батареї. Вітрогенератор отримує трифазну напругу від системи, а також стабілізовану постійну напругу, яка живить генератор (рис. 3.9).

Побудуємо структурну схему з використанням РПП Matlab. Комп’ютерна модель системи отримана в результаті роботи Simulink. Для моделювання системи подамо на вхід 10 В (рис. 3.10, 3.11).

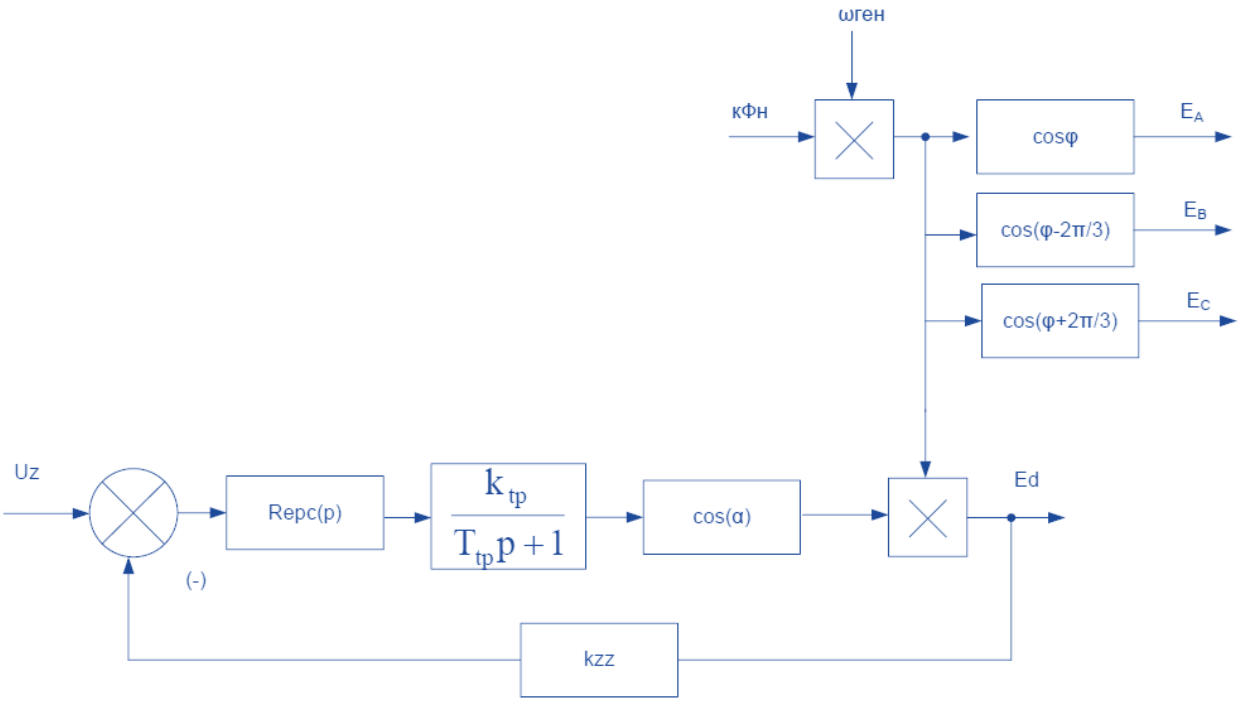


Рисунок 3.9 – Структурна схема ВЕУ:

кФн – номінальний магнітний потік, який створюється постійними магнітами; $\omega_{ген}$ – швидкість обертання вала генератора;

E_A, E_B, E_C – відповідно електрорушійні сили фазних напруг фаз А, Б та С;

U_z – задаюча напруга (може змінюватися від 0 до 10 В); R_{epc} – регулятор ЕРС, яка формується на виході випрямляча; k_{tp} – коефіцієнт підсилення тиристорного випрямляча; T_{tp} – постійна часу тиристорного випрямляча; α – кут відкривання тиристорів випрямляча; E_d – випрямлена ЕРС, якою заряджається акумуляторна батарея;

kzz – коефіцієнт зворотного зв’язку по ЕРС

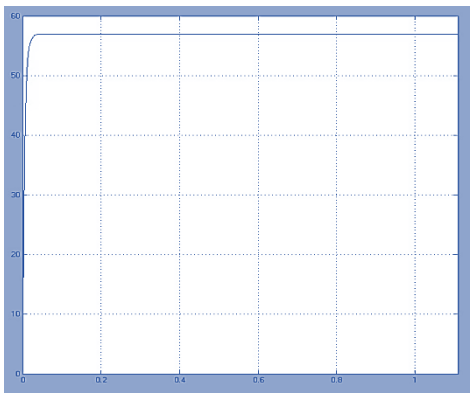


Рисунок 3.10 – Графік перехідного процесу випрямленої ЕРС на виході генератора

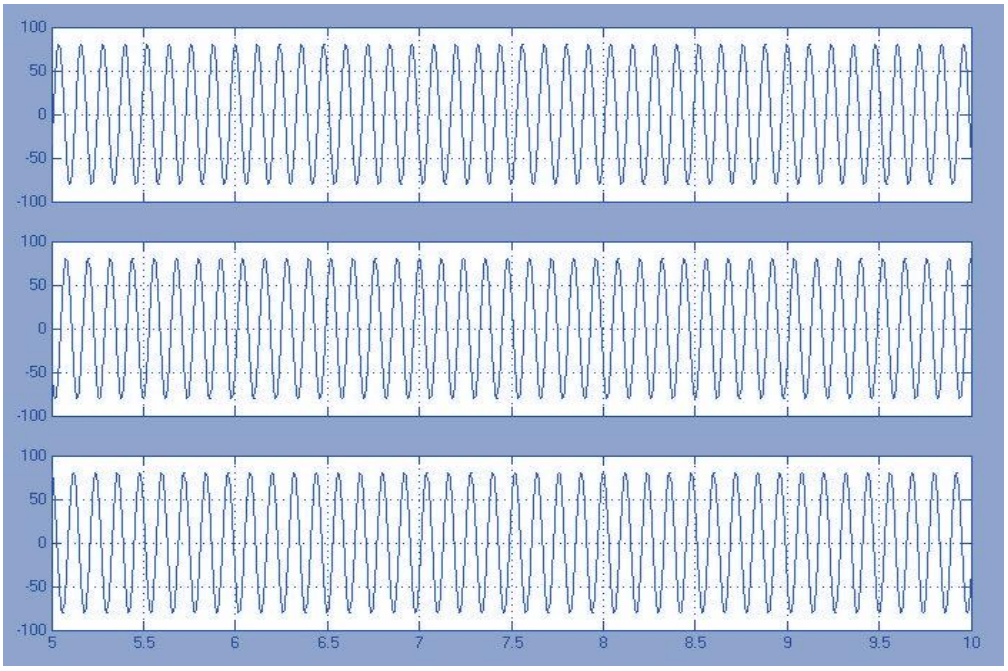


Рисунок 3.11 – Графіки фазних ЕРС на виході генератора (зверху до низу фази А, Б та С)

Як показано на графіках, на виході генератора є трифазна напруга 78 В. Ми отримуємо випрямлену ЕРС на рівні 59 В на виході випрямляча. Результати моделювання показали, що вимірювання були зроблені вірно. Промоделюємо роботу системи при різній швидкості від номінальної. Оскільки швидкість на валу генератора змінюється випадково, такий випадок слід розглянути. Для моделювання скористаємося джерелом сигналу швидкості обертання (рис. 3.12).

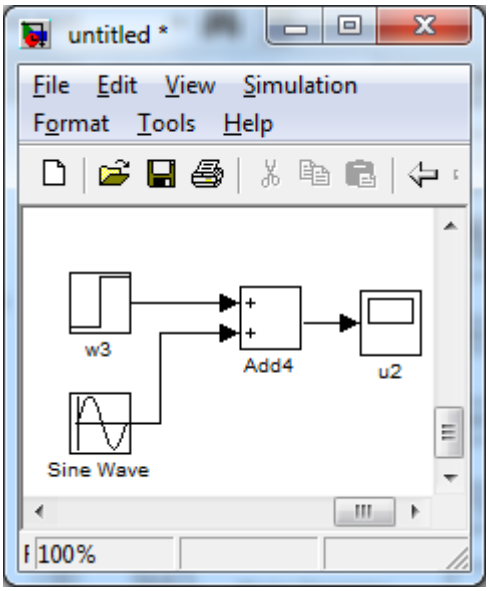


Рисунок 3.12 – Компютерна модель джерела сигналу швидкості обертання

Необхідно розділити вимоги автономних систем ЕП, включаючи вітроенергетичні установки, на дві групи. Перша група включає технологічні вимоги, такі як діапазон швидкості, точність статичної та динамічної підтримки, межі зміни моменту та прискорення, смуга пропускання частот, граничний час регулювання та інші.

Унікальні вимоги, викликані техніко-економічними особливостями самих пристроїв, такими як вартість, габарити, енергетичні характеристики, надійність тощо.

Техніко-економічні вимоги до електротехнічного комплексу ВЕУ включають наступні: високі значення потужності і моменту на валу виконавчого двигуна при мінімальних габаритах і масі; висока ремонтопридатність; низька енергоємність; уніфікація вузлів і компонентів; економічність і низька вартість.

Повне поєднання всіх вимог в одному пристрої практично неможливо. З цієї причини при розробці конкретної ВЕУ враховуються певні вимоги, нехтуючи іншими. Технічні вимоги ВЕУ підтверджують, що потрібно побудувати системи, які мають високу динаміку: діапазон потужності виконавчого електродвигуна 0,1…30 кВт; діапазон зміни швидкості від 50 до 1000:1; смуга пропускання частот від 30 до 1000 Гц; і короткочасне перевантаження по моменту кратністю від 2,5 до 3,0.

Кількість вироблюваної електроенергії в електростанціях є важливим фактором для визначення економічної ефективності ВЕУ. Коефіцієнт використання потужності є показником ефективності роботи електростанції. Це співвідношення між реальним річним виробництвом електроенергії в конкретній електростанції (в нашому випадку ВЕУ) і максимальним можливим виробництвом електроенергії залежно від використовуваних ресурсів.

3.5 Техніко-економічний розрахунок впровадження ВЕУ

Техніко-економічний розрахунок є важливим етапом оцінки доцільності впровадження вітроенергетичної установки. Він охоплює розрахунок вартості будівництва, експлуатаційних витрат, обсягу виробленої енергії та терміну окупності.

Вихідні дані для розрахунку. Для розрахунку приймаємо такі початкові умови:

- потужність ВЕУ – 2 МВт;
- 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) – 0,10 $/кВт·год.

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

$$C_{буд} = 1200 \text{ \$/кВт}.$$

Тоді:

$$C_{кап} = 2000 \cdot 1200 = 2400000 \text{ \$}.$$

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

$$C_{експ} = 0{,}02 \cdot C_{кап},$$

Тоді:

$$C_{експ} = 0{,}02 \cdot 2400000 = 48000 \text{ \$/рік}.$$

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:

$$T_{ок} = C_{кап} /(C_{дох} - C_{експ}) = 2400000/(210000 – 48000) \approx 15.2 \text{ років.}$$

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, впровадження вітроенергетичної установки потужністю 2 МВт за умов середньої швидкості вітру 7 м/с є технічно та економічно доцільним. Хоча термін окупності проєкту становить близько 15 років, це є прийнятним для інвестицій у відновлювану енергетику з урахуванням подальшого зниження експлуатаційних витрат та можливостей субсидій.

Подальші покращення можуть включати використання більш ефективних генераторів, оптимізацію систем накопичення енергії та інтеграцію в розумні мережі (smart grids) для підвищення загальної продуктивності.

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі було розглянуто та проаналізовано ключові аспекти підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок (ВЕУ).

У роботі було показано, що розвиток відновлюваної енергетики, зокрема вітрової, є важливим напрямом для досягнення енергетичної незалежності та зниження екологічного навантаження. Світові тенденції демонструють поступове збільшення частки ВДЕ у загальному енергетичному балансі до 50 % до 2050 року. Важливим є подальше впровадження інноваційних технологій для підвищення ефективності використання енергії вітру.

Проведено аналіз основних характеристик вітрового потоку, таких як швидкість вітру, щільність повітря, турбулентність та висота установки, що безпосередньо впливають на ефективність роботи ВЕУ. Виявлено, що регіони з середньою швидкістю вітру понад 5 м/с є найбільш перспективними для розташування вітрових установок.

В роботі проаналізовано основні типи ВЕУ: горизонтально-осьові та вертикально-осьові, а також представлено їх класифікацію за потужністю, кількістю лопатей та принципом використання енергії. Особливу увагу приділено сучасним генераторам та силовим перетворювачам, що впливають на продуктивність системи.

Запропоновано впровадження новітніх технологій, серед яких використання синхронних генераторів з постійними магнітами, оптимізація систем накопичення енергії та інтеграція в розумні мережі (smart grids). Використання сучасних технологій дозволяє підвищити коефіцієнт потужності та знизити втрати енергії в системі.

Проведено техніко-економічний розрахунок, в якому визначено доцільність впровадження ВЕУ потужністю 2 МВт при середній швидкості вітру 7 м/с. Річний обсяг виробництва електроенергії становить 2100000 кВт·год, що забезпечує дохід у розмірі 210000 $/рік при «зеленому тарифі».

Термін окупності проєкту становить приблизно 15 років, що є прийнятним для інвестицій у відновлювану енергетику.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію систем керування, впровадження більш ефективних конструкцій лопатей та вдосконалення процесу інтеграції ВЕУ до енергетичних мереж. Особливу увагу слід приділити адаптації технологій до регіональних умов та впровадженню інновацій у сфері енергоефективності.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують технічну та економічну доцільність впровадження вітроенергетичних установок для підвищення енергетичної незалежності та стабільності національної енергосистеми. Запропоновані рішення дозволять значно знизити екологічний вплив та сприятимуть розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

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