

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Вітроенергетична установка з горизонтальним/вертикальним
вітрогенератором»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПМ-01

Логвиненко Олексій Олександрович _____

Керівник:

к.т.н., доцент, доцент

Писарець Анна Валеріївна _____

Рецензент:

доцент, к.т.н., доцент

Самарцев Юрій Миколайович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	49	
3	A1	ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.СК	Складальний кресленик	1	
4	A3	ДПБ.ПМ-01.14.1760.01.001.	Гондола	1	
5	A3	ДПБ.ПМ-01.14.1760.01.002.	Лопать	1	
6	A3	ДПБ.ПМ-01.14.1760.01.003.	Обтічник	1	
7	A3	ДПБ.ПМ-01.14.1760.01.004.	Вал	1	
8	A2	ДПБ.ПМ-01.14.1760.02.000.СхС	Структурна схема	1	
9	A2	ДПБ.ПМ-01.14.1760.03.000.СхФ	Функціональна схема	1	
10	A1	ДПБ.ПМ-01.14.1760.04.000.	Результаті моделювання	1	

				ДПБ.ПМ-01.14.1760.01.000.ПЗ		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Логвиненко О.О.				1	1
Керівн.	Писарець А.В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-01	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В.					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Вітроенергетична установка з
горизонтальним/вертикальним вітрогенератором»

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Логвиненку Олексію Олександровичу

1. Тема проєкту «Вітроенергетична установка з горизонтальним/вертикальним вітрогенератором», керівник проєкту Писарець Анна Валеріївна к.т.н., доцент, доцент, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р.
№ _____
2. Термін подання студентом проєкту 31.05.2024
3. Вихідні дані до проєкту : Параметри вітроенергетичної установки: вихідна потужність – 50 кВт, діаметр ротора – 19,2м, висота вежі – 24,4м, коефіцієнт потужності $C_p = 0,45$, густина повітря, $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд існуючих вітроенергетичних установок. Загальна будова вітроенергетичної установки з горизонтально – осьовим вітрогенератором. Математична модель вітроенергетичної установки. моделювання роботи системи. Висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 5.1. Вітроенергетична установка з горизонтальним вітрогенератором. Структурна схема. 1 арк. ф. А2. 5.2. Вітроенергетична установка з горизонтальним вітрогенератором. Функціональна схема. 1 арк. ф. А2. 5.3. Вітрогенератор. Складальний кресленик. 1 арк. ф. А1. 5.4. Робочі креслення деталей. 1 арк. ф. А1. 5.5. Вітроенергетична установка з горизонтальним вітрогенератором. Графічні матеріали. 2 арк. ф. А1.

6. Дата видачі завдання 15.02.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Ознайомлення з завданням дипломного проекту	15.04.2024	
2	аналіз існуючих аналогів та огляд літературних джерел	22.04.2024	
3	Розробка структурних схем	04.05.2024	
4	Розробка математичної моделі	15.05.2024	
5	Моделювання роботи системи	24.05.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки ДП	29.05.2024	
7	Оформлення графічної частини ДП	30.05.2024	
8	Представлення ДП науковому керівнику	31.05.2024	
9	Подання ДП до Екзаменаційної комісії	04.06.2024	
10	Захист кваліфікаційних робіт	17.06.2024	

Студент

Олексій ЛОГВИНЕНКО

Керівник

Анна ПИСАРЕЦЬ

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено вітроенергетичним установкам з горизонтальними вітрогенераторами, які є найбільш ефективними засобами перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію.

У роботі проаналізовано класифікацію вітроенергетичних установок за різними ознаками (потужністю, формою вітрогенератора), їх структуру та основні компоненти, особливості застосування різних видів установок.

Виявлено, що ефективність роботи вітроустановки з горизонтальним ротором підвищується застосуванням системи орієнтації на напрям вітру; для реалізації якої запропоновано застосувати систему стеження з лазерним випромінюванням. Такі системи дозволяють значно зменшити втрати енергії через неефективне розташування лопатей відносно напрямку вітру, забезпечуючи більш стабільну та високу продуктивність установки. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню витрат на експлуатацію та підвищенню економічної доцільності використання вітроенергетичних установок.

Здійснено розрахунки об'єму та маси лопаті вітрогенератора, максимального обертаючого моменту, потужності вітроустановки та виробленої енергії залежно від швидкості вітру

Ключові слова: вітроенергетична установка, вітрогенератор, горизонтальний ротор, система стеження, відновлювальна енергія.

ABSTRACT

Diploma project is devoted to wind power plants with horizontal wind turbines, which are the most efficient means of converting the kinetic energy of the wind into electrical energy.

The work analyzes the classification of wind power plants by various characteristics (power, wind turbine shape), their structure and main components, and the peculiarities of using different types of plants.

It is found that the efficiency of a wind turbine with a horizontal rotor is increased by the use of a wind direction orientation system; for the implementation of which it is proposed to use a laser tracking system. Such systems can significantly reduce energy losses due to inefficient blade positioning relative to the wind direction, providing a more stable and high performance of the installation. This, in turn, helps to reduce operating costs and increase the economic feasibility of using wind power plants.

The calculations of the volume and mass of the wind turbine blade, the maximum torque, the power of the wind turbine, and the generated energy depending on the wind speed are carried out.

Keywords: wind power plant, wind turbine, horizontal rotor, tracking system, renewable energy.

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НВДЕ – нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії;

ВЕУ – вітроенергетична установка;

ВГ – вітрогенератор;

ВУ – вітроустановка;

ЄС – Євросоюз;

МК – мікроконтролер;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

LiDAR – Lightning and Ranging.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК	13
1.1. Принцип роботи вітроенергетичної установки	13
1.2. Характеристики вітрогенератора	14
1.3. Класифікація вітроенергетичних установок	15
1.4. Особливості роботи вітроенергетичних установок	17
Висновки до розділу 1	18
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА БУДОВА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ГОРИЗОНТАЛЬНО – ОСЬОВИМ ВІТРОГЕНЕРАТОРОМ.....	19
2.1. Загальна будова ВЕУ	19
2.2. Структурна схема вітроенергетичної установки	22
2.3. Системи стеження за напрямом вітру	22
2.4. Структурна схема системи стеження за напрямом вітру	26
Висновки до розділу 2	28
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЕУ ТА СИСТЕМИ.....	30
3.1. Кінематична модель вітроенергетичної установки	30
3.2. Динамічна модель вітроенергетичної установки.....	33
3.3. Модель системи стеження за напрямом вітру LiDAR	36
Висновки до розділу 3	37
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ	39

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Логвиненко О.О.			<i>ЗМІСТ</i>	Літера	Аркиви	Архівів
Перевір.		Писарець А.В.				9	49	
Реценз.						<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		
Н. Контр.								
Затверд.		Писарець А.В.						

4.1. Розрахунки вітроенергетичної установки	39
4.2. Розрахунок об'єму та маси лопаті	40
4.3. Розрахунок максимального крутного моменту та діаметру валу	40
4.4. Розрахунки системи стеження за напрямом вітру	42
4.5. Розрахунок потужності ВЕУ залежно від швидкості вітру	43
4.6. Розрахунок виробленої енергії в залежності від швидкості вітру	45
Висновки до розділу 4	47
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Логвиненко О.О.</i>			ЗМІСТ	<i>Літера</i>	<i>Аркви</i>	<i>Архиви</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Писарець А.В.</i>					10	49
<i>Реценз.</i>						<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Писарець А.В.</i>						

ВСТУП

Вітроенергетика – одна з провідних галузей енергетики, що використовує кінетичну енергію вітряних потоків для отримання енергії. Метод отримання енергії з вітрів зародився ще в далекі часи та є одним з найдавніших. Вітер утворюється за рахунок різниці атмосферного тиску, тобто з пропорційною швидкістю відбувається рух потоків від високих до низьких зон атмосферного тиску.

Нині альтернативна енергетика з використанням нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії (НВДЕ) – це один з основних напрямків для розвитку технологій, оскільки відіграє велику роль у новому постіндустріальному укладі. Кожного року стрімко зростає кількість споживання електроенергії. Так, дослідники прогнозують, що в найближче десятиліття обсяги видобування традиційної енергії зростуть в межах 3 %, коли обсяги нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії зростуть до 9 % [1].

Вітроенергетика постійно розвивається і на даний момент займає одне з провідних місць як екологічний метод отримання енергії. Поява сучасніших моделей генераторів, використання технологій моделювання, розвиток силової електроніки – все це сприяє стрімкому розвитку даної галузі альтернативної енергетики.

Порівняно із світом енергетика України має більш загострені проблеми з видобуванням та використанням традиційних джерел енергії, викопних палив. Причин тому достатньо. Технології видобування не відповідають стандартам, знижена ефективність, відповідно це тільки збільшує кількість шкідливих викидів до навколишнього середовища. Великі втрати під час розподілу, транспортування. Монопольна залежність ще більше б'є по ринку енергетики України. Світ та його лідери впевнені, що перехід на використання НВДЕ – це шлях для вирішення проблеми енергозабезпечення у світі.

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Навіть якщо залишається спірним питання, чи була б вітроенергетика конкурентоспроможною без рекламної підтримки, не викликає сумнівів, що вітроенергетика досягла значного прогресу. Якщо на початку 1990-х років вартість систем становила в середньому майже 1300 євро/кВт, то зараз питомі інвестиційні витрати знизилися до 900 євро/кВт. Переваги масового виробництва ще більше зросли завдяки значному підвищенню ефективності турбін (більша висота маточини, більший діаметр ротора тощо), що покращило економічність вітроенергетики. Зараз на ринку є турбіни з номінальною потужністю до 6 МВт. Ця тенденція свідчить, що ринок вітроенергетики зростає в основному за рахунок виробництва електроенергії та передачі її в мережу [2].

Потенціал вітроенергетики в багатьох країнах, що розвиваються, та країнах з перехідною економікою є значним. У багатьох місцях виробництво електроенергії з енергії вітру є економічно вигідною альтернативою використанню традиційних викопних джерел енергії, таких як вугілля або дизельне паливо. У країнах, що розвиваються, вітрогенератори(ВГ) є альтернативою традиційним електростанціям. Порівняно з електростанціями, що працюють на викопному паливі, вітроенергетика може бути економічно ефективною в багатьох місцях, а також не забруднює навколишнє середовище і зменшує залежність від імпорту викопного палива

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Пристрої, які перетворюють енергію вітру у корисну механічну, електричну або теплову енергію, називаються вітроенергетичними установками (ВЕУ).

Сучасні ВЕУ представляють собою складну автоматизовану електромеханічну систему з перетворення кінетичної енергії рушійних мас повітря (вітрового потоку) в електричну із заданою якістю.

Основною частиною ВЕУ є вітроагрегат, що містить такі складові:

- Вітродвигун;
- Система передачі потужності споживачу;
- Споживач вітрової енергії (Будь-який пристрій, як потребує електроенергії для роботи, тобто генератори, насоси тощо).

1.1. Принцип роботи вітроенергетичної установки

Пориви вітру, які потрапляють до турбіни змушують її обертатися навколо вісі. Початковий елемент, де утворюються енергія – вал вітротурбіни. Кількість енергії, що виникає на валу пропорційно залежить від швидкості вітряних потоків. Сильніше вітер, відповідно більше виробленої енергії на валу.

Далі в мультиплікатор потрапляє енергія з валу, який її генерує. Не в усіх ВЕУ присутній мультиплікатор, оскільки він потребує додаткової енергії для прискорення обертання вісі, що є головним призначенням елемента. Тому вітроенергетичні установки за відсутністю мультиплікатора, зазвичай, мають більшу ефективність роботи [3, 4].

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Логвиненко О.О.</i>			<i>РОЗДІЛ 1</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркиви</i>	<i>Арквнів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Писарець А.В.</i>					13	49
<i>Реценз.</i>						<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Писарець А.В.</i>						

1.2. Характеристики вітрогенератора

Основними характеристиками ВГ є площа обмітання, геометричне заповнення, коефіцієнт потужності, коефіцієнт швидкохідності, кубічна залежність ВГ.

Площа обмітання – це площа, яку займає обертова лопасть вітряної турбіни під час обертання. Цей параметр є важливим для визначення максимально доступного обсягу вітру, який може використовуватися для генерації електроенергії. Чим більша площа обмітання, тим більше енергії може бути захоплено з вітру і перетворено на електроенергію.

Геометричне заповнення – це співвідношення між площею обмітання турбіни та площею кругової області, в яку вона вписана. Геометричне заповнення впливає на ефективність вітряної турбіни: чим вище геометричне заповнення, тим більш ефективно турбіна використовує доступний вітер. Турбіни з високим геометричним заповненням зазвичай мають більшу ефективність за низьких швидкостей вітру.

Коефіцієнт потужності – це співвідношення між фактично виробленою електроенергією турбіни і максимально можливою електроенергією, яку турбіна може виробити за ідеальних умов. Коефіцієнт потужності демонструє ефективність турбіни: чим вищий коефіцієнт, тим більше енергії може бути вироблено з вітру.

Ідеальний коефіцієнт потужності дорівнює 1, але на практиці він зазвичай менший через такі фактори, як турбулентність вітру, втрати енергії на тертя тощо.

Коефіцієнт швидкохідності – це відношення швидкості на виході вітру з турбіни до швидкості вітру перед вхідним відсіком турбіни. Високий коефіцієнт швидкохідності вказує на те, що турбіна ефективно зменшує швидкість вітру і виробляє більше електроенергії. Цей показник важливий для оцінки впливу турбіни на вітер у навколишньому середовищі та її ефективність у виробництві електроенергії.

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Кубічна залежність вітрогенератора. Між швидкістю ввімкнення та номінальною швидкістю, за якої досягається максимальна потужність, вихідна потужність буде збільшуватися в кубічній залежності від швидкості вітру[5].

Швидкість вмикання - це точка, в якій вітрова турбіна здатна генерувати енергію.

Швидкість вимикання - це точка, в якій турбіна повинна бути вимкнена, щоб уникнути пошкодження обладнання. Швидкість вмикання та вимикання пов'язані з конструкцією та розміром турбіни і визначаються до початку будівництва.

1.3. Класифікація вітроенергетичних установок

ВЕУ класифікують за різними ознаками (призначенням, напрямом вісі обертання ВГ, потужністю, кількістю лопатей).

Умовно, вітрогенератори можна поділити на три класи за областю використання [6]:

- Приватне призначення;
- Спеціальне призначення;
- Промислове призначення.

Розглянемо ВГ для приватного призначення. Основними характеристиками є невелика потужність і, зазвичай, використовуються в мережах як джерело додаткової електроенергії.

Вітрогенератори спеціального призначення характеризуються низькою потужністю виготовлення енергії та на відміну від приватних ВГ використовуються без інвертора. Зазвичай ВГ такого класу використовуються на окремих об'єктах (наприклад, вантажні кораблі, гірські райони, віддалені острови, дахи будівель тощо).

Промислові ВГ. Зазвичай, встановленням та експлуатацією промислових ВГ займаються енергетичні компанії або державні органи, що пов'язані з розвитком та підтримкою вітроенергетики в країні.

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Порівняно зі своїми конкурентами, промислові ВГ мають високу потужність. Також ці генератори часто об'єднують до однієї електромережі для ефективності.

Вітрогенератори, що використовуються в якості приводу електричного генератора ВЕУ, поділяють на два основних класи [2, 7, 8]:

- горизонтально-осьові (вісь вітроколеса є паралельною до вітрового потоку).
- вертикально-осьові (вісь вітроколеса є перпендикулярна повітряному потоку);

Через особливості конструкції ВГ з вертикальною віссю (рис. 1.1) завжди знаходяться в робочому положення, незалежно від напрямку вітру.



Рис. 1.1. Приклад вертикально-осьової ВЕУ [9]

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

За потужністю ВЕУ поділяють на наступні [7]:

- ВЕУ малої потужності – до 100 кВт;
- ВЕУ середньої потужності – 100...500 кВт;
- ВЕУ мегаватного класу – 0,5...4 МВт та вище.

За кількістю лопатей ВЕУ поділяють:

- Дволопатні;
- Трьохлопаті (рис. 1.2);
- Багатолопатні (більше 3-ох лопатей ВГ).



Рис. 1.2. Приклад горизонтально-осьової ВЕУ [10]

1.4. Особливості роботи вітроенергетичних установок

Перевагами застосування горизонтально – осьових ВЕУ є :

- Високий ККД використання енергії;
- Високе значення початкової швидкохідності;
- Стійкість вітроколеса до сильних вітрових потоків;
- Наявність механізмів та систем керування поворотом лопатей вітроколеса;
- Високі економічно-технічні показники;

Недоліком таких установок є необхідність у пристрої орієнтації на напрям вітру.

Позитивними якостями застосування вертикально – осьових ВЕУ є [11]:

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

– Відсутність систем орієнтації. Ефективність роботи вертикальних ВЕУ залежить лише від швидкості вітряних потоків;

– Одна вісь обертання ВГ та вітроколеса, що дозволяє розмістити всі необхідні елементи внизу установки(редуктор, генератор, тощо);

– Порівняно з горизонтальним ВЕУ низьке навантаження на опору установки;

– Потужність установки обмежується тільки висотою щогли і потужністю інвертора;

– Суттєво менші шумовий фон (до 20–50 дБ), магнітне випромінювання і вібрації;

– Стійкість до високих поривів вітру;

– Простота конструкції дозволяє легко та без проблем транспортувати ВЕУ; Проте такі ВЕУ характеризуються меншими коефіцієнтом використання енергії вітру та швидкохідністю. При цьому ВЕУ з горизонтальною віссю обертання мають більший ККД і меншу вартість.

Висновки до розділу 1

Аналіз особливостей застосування вітроенергетичних установок з вертикальними та горизонтальними вітрогенераторами свідчить про наступне:

- коефіцієнт корисної дії значно більший ніж у вертикально-осьових ВЕУ;
- горизонтально-осьові установки мають кращу ефективність роботи та більше адаптовані до роботи в складних умовах; можуть генерувати більшу кількість енергії за рахунок більших розмірів ротору порівняно з вертикальними установками;
- горизонтально-осьові ВЕУ забезпечують високу та стабільну продуктивність в системах вітроелектростанцій.

Основним недоліком горизонтальних вітроенергетичних установок є наявність системи стеження за напрямом вітру, що має вплив на загальну ефективність їх роботи.

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

РОЗДІЛ 2.

ЗАГАЛЬНА БУДОВА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ГОРИЗОНТАЛЬНО – ОСЬОВИМ ВІТРОГЕНЕРАТОРОМ

Основними структурними елементами ВЕУ з горизонтально – осьовим ВГ: вітроколесо, гондола, вежа, фундамент (рис. 2.1).

2.1. Загальна будова ВЕУ

Вітроколесо складається з лопатей, розташованих на роторі, якік під дією повітряного потоку приводять ротор до руху.

Гондола – корпус, в якому знаходиться вітрогенератор.

Вежа – опора, на якій закріплюються гондола та ВГ.

Фундамент – частина, до якої безпосередньо кріпляться вісь генератора, хвостова балка, вісь поворотного механізму, тормозний механізм.

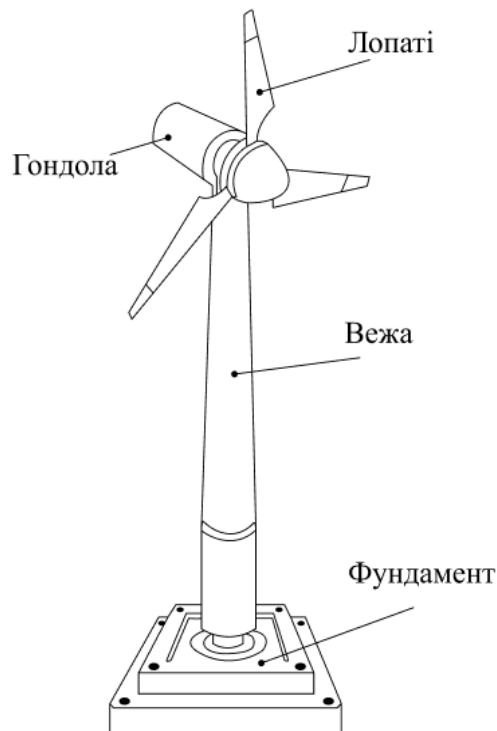


Рис. 2.1. Загальна будова ВЕУ [12]

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Логвиненко О.О.			<i>РОЗДІЛ 2</i>	Літера	Аркиви	Архивів
Перевір.		Писарець А.В.					19	49
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Писарець А.В.				<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		

Основними елементами гондоли в складі ВЕУ є (рис. 2.2):

- *Анемометр та флюгер*. Анемометр потрібний для вимірювання швидкості вітру. Отримані від нього дані допомагають оптимізувати роботу вітрогенератора; Флюгер визначає напрям потоків повітря. Задає правильний напрям вітрогенератора для збереження ефективності роботи
- *Високошвидкісний вал* потрібний для передачі енергії від редуктора до генератора, має високу швидкість обертання, що дозволяє ефективно виробляти енергію;
- *Низькошвидкісний вал*. Забезпечує передачу обертального моменту від лопатей ротору до редуктора. Оберти повільні за рахунок низьких швидкостей ротору;
- *Мультиплексор (редуктор)*. Збільшує швидкість обертання валу, передаючи енергію від низько- до високошвидкісного валу. За рахунок цього генератор працює більш ефективно, оскільки потребує високих швидкостей обертання для генерації електроенергії.
- *Лопаті ВГ*. Початкове перетворення кінетичної енергії в механічну відбувається саме за допомогою лопатей, які енергію вітру перетворюють в обертальний момент.
- *Обтічник ротору* захищає внутрішні елементи гондоли від впливу навколишнього середовища та зменшує аеродинамічний опір, що покращує роботу ВГ.
- *Сервопривод встановлення лопатей*. Призначений для зміни кута нахилу лопатей і запобігає надмірному навантаженню на лопаті за різних швидкостей вітру.
- *Підшипники*. зменшують коефіцієнт зношення та тертя компонентів, що збільшує довговічність і надійність системи.

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- *Сервопривод повороту гондоли* виконує функцію зміни напрямку гондоли відносно напрямку вітру задля захоплення максимальної можливої площі для високої ефективності роботи ВЕУ.
- *Гальмо* використовується у випадках надмірного вітру для запобігання пошкодженню, а також для зупинки ротора при обслуговуванні або ремонті несправних частин.
- *Генератор* – один з ключових елементів установки для отримання електроенергії.
- *Вежа* – забезпечує надійність та безпеку конструкції, підтримує лопаті, та гондолу з усіма елементами на висоті, де швидкість вітру зазвичай вища і більш стабільна. Висота може відрізнятись залежно від потреб ВЕУ.

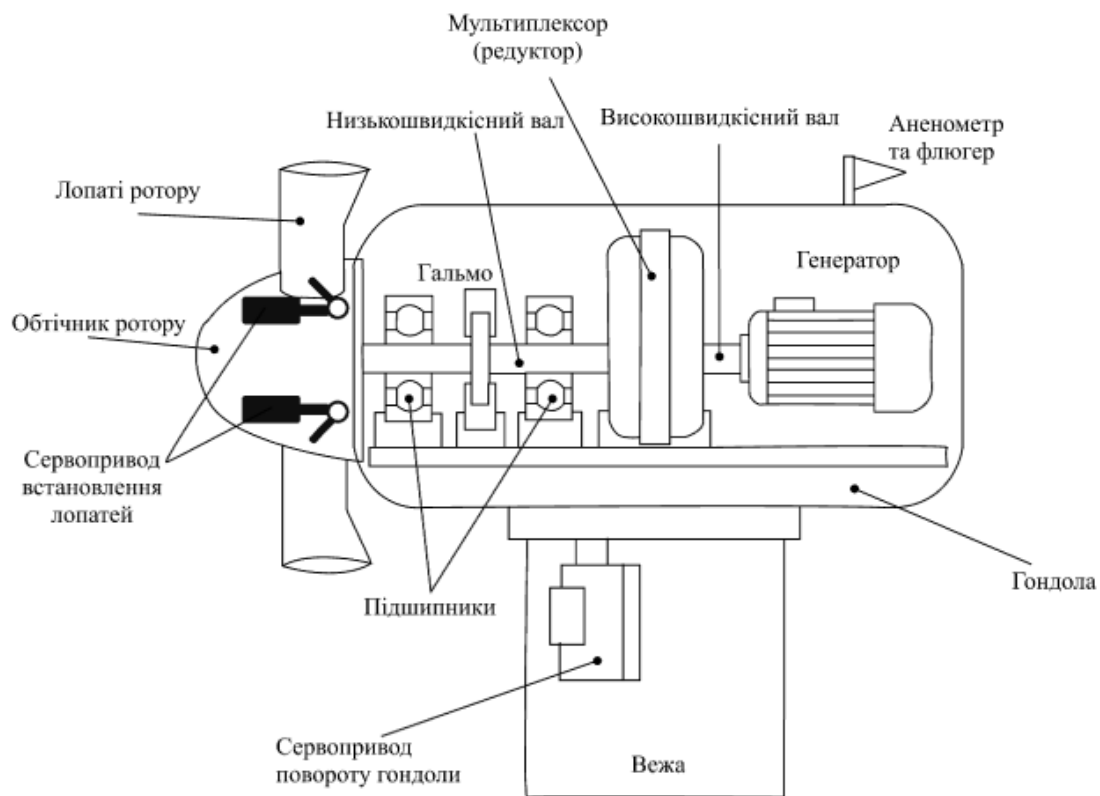


Рис. 2.2. Основні елементи гондоли в складі ВЕУ [2]

2.2. Структурна схема вітроенергетичної установки

Загальний вигляд структурної схеми ВЕУ з горизонтально-осьовим ротором наведено на рис. 2.3.

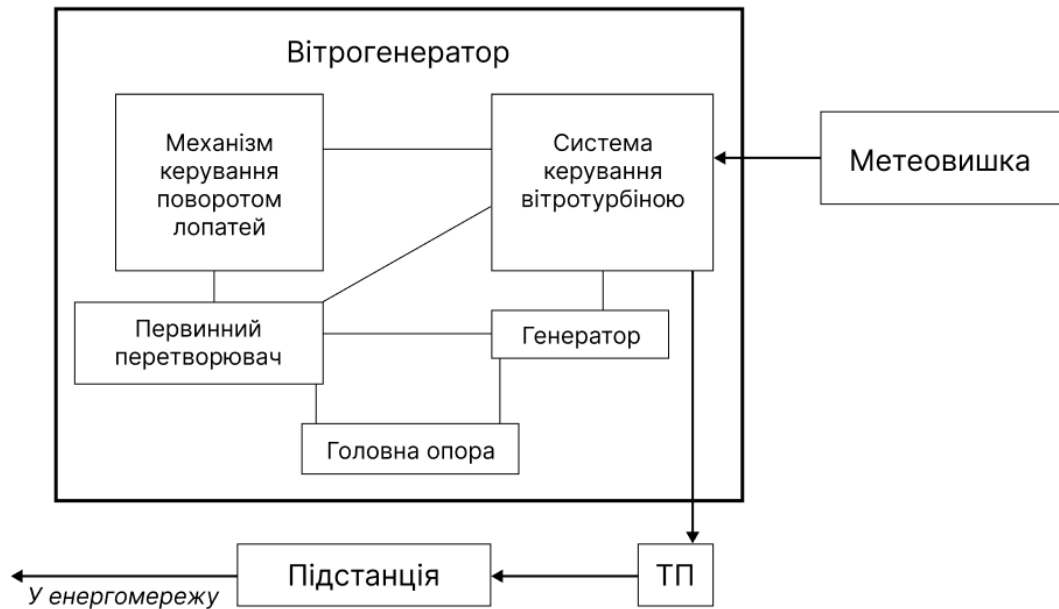


Рис. 2.3. Структурна схема вітроенергетичної установки

Первинний перетворювач – одна з функціональних частин ВЕУ, яка відповідає за перетворення енергії з кінетичної на обертальний рух генератора. Генератор, в свою чергу, механічну енергію перетворює в кінетичну.

ТП – трансформаторна підстанція, яка необхідна для підвищення напруги від генераторів ВЕУ до величини лінії електропередачі електроенергії, що здійснюється для стабільної передачі енергії.

Підстанція розподіляє та передає енергію в енергосистему до споживача.

2.3. Системи стеження за напрямом вітру

Постійна орієнтація за напрямом потоків вітру потребує наявності систем, які знижують ефективність, надійність ВЕУ (до 13% від загальної кількості відмов) та ускладнюють саму конструкцію. Зміна напрямку вітру, передусім відбувається у горизонтальній площині.

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Максимальну ефективність ВЕУ набуває при перпендикулярності вітряного потоку до площини, в якій знаходиться вітроколесо (рис. 2.4).

Тому регулярна зміна напрямку вітру зменшує ефективність роботи вітроустановки через необхідність налаштування положення осі відповідно до напрямку потоку вітру.

Якщо вітер спрямований до осі обертання вітроколеса під гострим кутом, то площа потоку повітря, яку охоплює вітроколесо, зменшується, внаслідок чого знижується потужність вітроустановки.

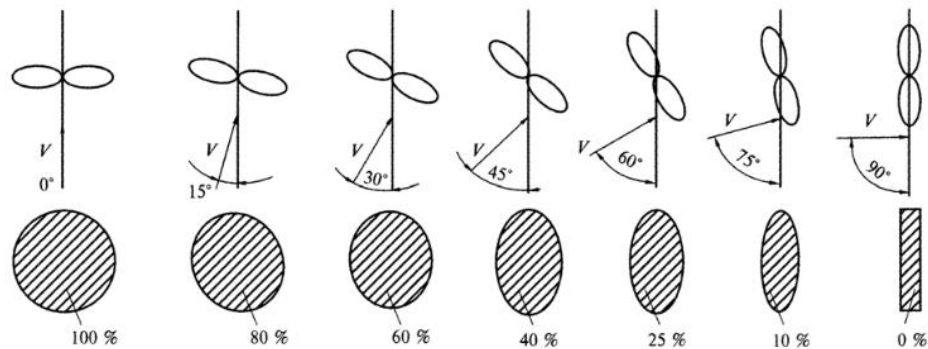


Рис. 2.4. Зміна площі охоплення за різних кутів між напрямом вітру та віссю обертання [13]

Наявність системи орієнтації ускладнює конструкцію вітроустановок. Крім того, за постійних змін напрямку вітру внаслідок інертності механізму фактично неможливо абсолютно точно і ефективно орієнтувати вітроколесо. У найпростіших ВЕУ орієнтація за напрямком вітру здійснюється вручну, у досконаліших – вітроколесо повертається автоматично.

Ручна орієнтація здійснюється або звичайним важелем, закріпленим на поворотній частині, або за допомогою механічної передачі. Автоматична орієнтація за напрямком вітру здійснюється переважно такими чотирма способами[11]:

- 1) хвостовим стабілізатором (аналог флюгера);
- 2) невеликими вітряками(віндрозами), які називаються віндрозами і діють на поворотну частину ВК через зубчасту передачу[11];

- 3) розміщенням вітроколеса позаду вежі за принципом хвостового стабілізатора;
- 4) орієнтація за допомогою електричних, гідравлічний або пневматичних приводів.

Розглянемо приклад системи стеження з лазерним випромінюванням LiDAR(Light Detection and Ranging).

LiDAR - функціонує, відбиваючи лазерний промінь світла від частинок повітря, з якими він контактує. Відбита хвиля потім збирається телескопом, що дозволяє обчислити різницю в частоті, застосовуючи ефект Доплера до швидкостей частинок. Таким чином визначається швидкість вітру. Вітрові LiDAR-системи, встановлені на турбінах, використовуються для вимірювання швидкості і напрямку вітру, серед іншого, для перевірки ефективності роботи вітрових електростанцій.

На даний момент системи стеження LiDAR є одними з передових для збору та визначення даних про швидкість та напрям руху вітру в вітроенергетичних установках. Але незважаючи на свої переваги, такі системи мають досить суттєвий недолік – це висока чутливість до погодних умов, що спричиняє зменшення ефективності роботи системи та ВЕУ загалом. Це пов'язано з тим, що використовується один лазер, що випромінює певну довжину хвиль. При погіршенні погодних умов ці хвилі можуть блокуватися або розсіюватися атмосферними частинками, що суттєво зменшує збір даних про вітер та ефективність (рис. 2.5, рис. 2.6).

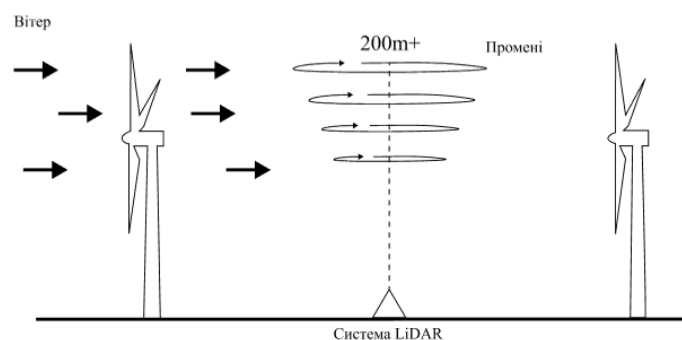


Рис. 2.5. Приклад наземної системи LiDAR[14]

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

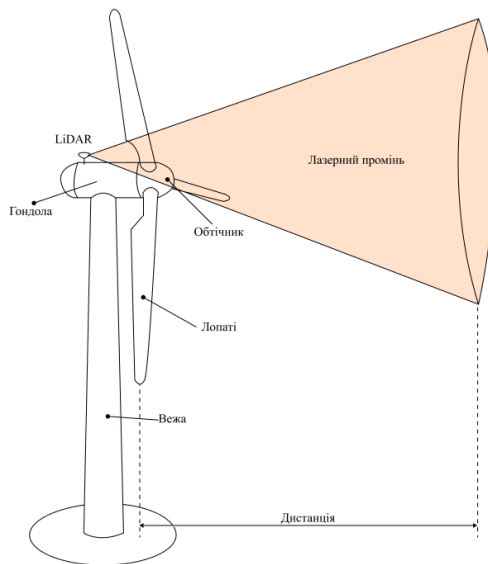


Рис. 2.6. Система стеження LiDAR з розташуванням на вершині гондоли ВЕУ [15]

Система стеження LiDAR може бути розташована як на вершині гондоли ВЕУ (рис. 2.7), та і окремо (рис. 2.8).



Рис. 2.7. Система стеження LiDAR розташована на вершині гондоли ВЕУ [16]

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



Рис. 2.8. Приклад наземного використання системи стеження LiDAR [17]

Метод, який допоможе зберегти ефективність вітроустановки та покращити роботу системи LiDAR – це використання багатохвильового випромінювання та збільшення кількості точок випромінювання в системі.

За рахунок збільшення кількості лазерів системи, з’являється можливість випромінювання хвиль на різних довжинах.

Це спричиняє отримання більш точних даних, оскільки при блокуванні або розсіюванні однієї з довжин, інші залишаються ефективними. Таким чином, при зміні погодних умов, система збирає інформацію про швидкість та напрям руху повітря з довжин хвиль, які не зазнали розсіювання або блокування в атмосфері.

Впровадження цього методу для системи стеження за напрямом вітру LiDAR допоможе збільшити точність, кількість даних для аналізу стану вітру загалом та зберегти ефективність роботи ВЕУ в умовах дощу, туману, та інших природних явищ.

2.4. Структурна схема системи стеження за напрямом вітру

Система стеження за напрямом вітру LiDAR складається з наступних елементів (рис. 2.9): мікроконтролер, система керування лазерними датчиками, лазерні датчики, оптична система, приймачі сигналу.

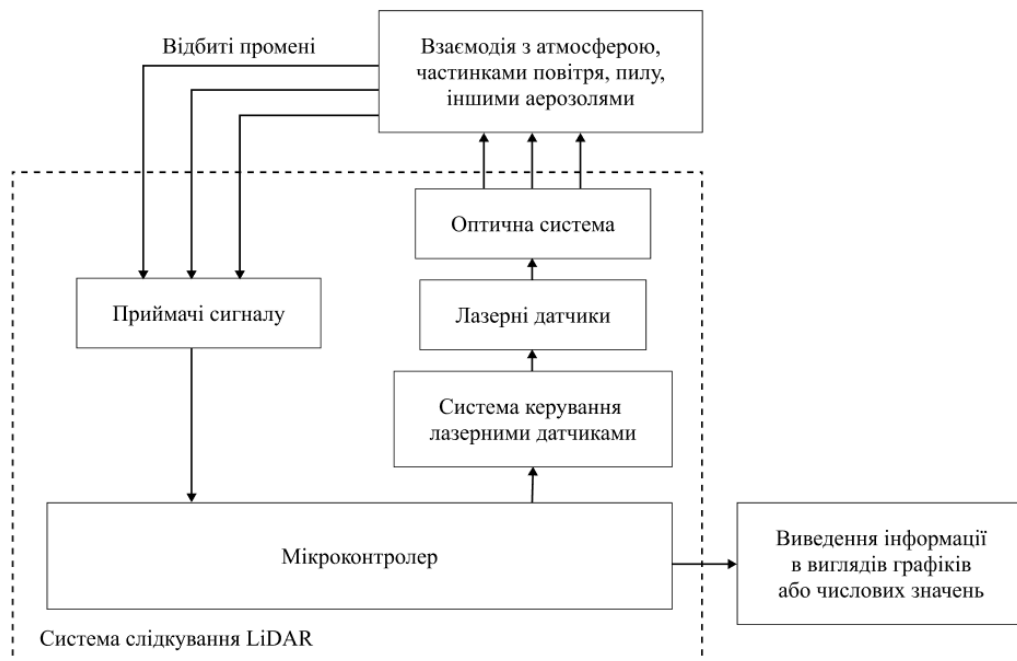


Рис. 2.9. Структурна схема системи стеження за напрямом вітру LiDAR

Мікроконтролер – це головний компонент всієї системи, що контролює та координує роботу системи загалом. У випадку системи LiDAR здійснюється керування лазерними сенсорами, аналіз та обробка інформації отриманої від приймачів з подальшим виведенням результатів на моніторі.

Система керування лазерними сенсорами – система, за допомогою якої регулюються параметри самих сенсорів, наприклад, напрям лазера, потужність, довжина тощо.

Лазерні сенсори – враховуючи метод удосконалення системи, генерують N кількість променів різної довжини хвиль, які пізніше взаємодіють з атмосферою.

Оптична система – згенеровані промені сенсорів проходять через оптичну систему, яка в подальшому фокусує та спрямовує промені в потрібну область для виимірювання та збору даних.

Приймач сигналу – це певний елемент, що приймає оптичне випромінювання. Одним з приймачів сигналів в системі LiDAR може бути телескоп. Збираючи відбите світло променів, перетворює його в електричний сигнал, які згодом надходять до МК.

У цей час МК аналізує отримані дані, визначаючи необхідні параметри за рахунок зміни доплерівської частоти, тощо.

Система працює наступним чином. Мікроконтролер надсилає сигнал/команду до системи керування лазерними датчиками, після чого датчики створюють випромінювання на різних довжинах хвиль, які в подальшому проходять через оптичну систему. За допомогою оптичної системи відбувається фокусування лазерних променів та подальше їх спрямування до потрібної області в атмосфері, де потрібно виміряти параметри вітру. Потрапивши до атмосфери починається взаємодія з різноманітними аерозолями, частинками вітру, тощо.

Наступним кроком є приймач сигналу, в нашому випадку, телескоп, що збирає відбите світло променів, перетворюючи в електричний сигнал для подальшої обробки отриманої інформації. Далі сигнал надходить до мікроконтролера, де відбувається аналіз отриманих даних за рахунок зміни доплерівської частоти. В результаті пройденого циклу на монітори виводиться детальна інформація щодо параметрів вітру, таких як швидкість, напрям, тощо.

Також потрібно враховувати, що точність отриманих даних при багатохвильовому випромінюванні на різних довжинах залежить від кількості джерел випромінювання та враховувати хвилі, які зазнали блокування або розвіювання в атмосфері через несприятливі погодні умови.

Висновки до розділу 2

Наявність системи орієнтації на напрям вітру ускладнює конструкцію горизонтально-осьової вітроустановки, проте підвищує ефективність її роботи.

Орієнтація на напрям вітру здійснюється різними методами (застосуванням хвостових стабілізаторів, віндроз, електричних, гідравлічних або пневматичних приводів тощо).

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

У роботі запропоновано застосувати системи стеження з лазерним випромінюванням LiDAR, що дозволить підвищити ефективність роботи вітроустановки, здійснювати оптимальне налаштування ротора та лопатей, а також сприятиме технологічним інноваціям у вітроенергетиці.

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ІЗ</i>	Арк.
						29
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 3.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЕУ ТА СИСТЕМИ

Розглянемо кінематичну та динамічну модель вітроенергетичної установки.

3.1. Кінематична модель вітроенергетичної установки

Кінематична модель ВЕУ дозволяє проаналізувати рух та поведінку основних елементів, а також передбачити, як буде рухатися та змінюватися генератор залежно від різних факторів [18]:

Основними елементами кінематичної моделі ВГ є:

- Динамічне рівняння руху;
- Кінематичні параметри лопатей;
- Рух ротора та генератора;
- Взаємодія з вітром.

Динамічне рівняння руху. Рух ротора та лопатей вітрогенератора описуються динамічним рівнянням з урахуванням їхньої взаємодії з повітрям. У цьому рівнянні враховано масу, інерцію та зовнішні сили, яким піддається система. Рух кожного елемента вітрогенератора може бути описаний диференціальним рівнянням або системою диференціальних рівнянь, яка представляє основну форму динамічного рівняння руху.

$$M * x'' = F,$$

де M – матриця маси або момент інерції, x'' - друга похідна від часу від координати x , відповідає прискоренню, F – визначає зовнішні сили, що діють на систему.

Параметри та вигляд цього рівняння можуть змінюватися, оскільки вони залежать від конкретної системи, її структури та моделей, якими користуються.

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Логвиненко О.О.			<i>РОЗДІЛ 3</i>	Літера	Аркиви	Аркунів
Перевір.		Писарець А.В.					30	49
Реценз.						<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		
Н. Контр.								
Затверд.		Писарець А.В.						

Додатково можуть бути враховані аеродинамічні ефекти, гідродинаміка (для офшорних вітрогенераторів), електричні характеристики генератора та інші фактори.

Кінематичні параметри лопатей. Рух та поведінка лопатей вітрогенератора визначаються кінематичними параметрами. Йдеться про кут нахилу лопатей, ступінь повороту й швидкість зміни кута нахилу, генерація електричної енергії.

- *Кут нахилу лопатей* визначає, як потік повітря взаємодіє з лопатями. Впливає на ефективність захоплення вітрової енергії та створення аеродинамічних сил.

$$a = \arctan\left(\frac{V_{\text{вітер}}}{V_{\text{ротор}}}\right),$$

де $V_{\text{вітер}}$ – швидкість вітру, $V_{\text{ротор}}$ – швидкість обертання ротору.

Кут нахилу можна змінювати за допомогою системи керування для оптимізації захоплення енергії.

- *Ступінь повороту лопатей.* Положення лопатей відносно осі ротора і їх ступінь повороту визначають, яким чином вітер захоплюється лопатями. Цей параметр налаштовується, щоб оптимізувати виробництво електроенергії залежно від швидкості та напрямку повітря.

$$\theta(t) = \theta_n + \omega t, \text{ де}$$

θ_n – початковий кут, ω – кутова швидкість обертання, t – час.

- *Швидкість зміни кута нахилу* вказує на те, яка швидко може регулюватися позиція лопатей при зміні параметрів вітру. Для забезпечення ефективної роботи важливим аспектом є здатність швидко реагувати на коливання швидкості та напрямку вітру, для підтримання оптимального режиму роботи.

Генерація електричної енергії залежить від аеродинамічних сил, що діють на лопаті, також від швидкості обертання ротора.

$$P = C_p * S * \rho * \frac{v^3}{2}, \text{ де}$$

C_p – коефіцієнт потужності, S – площа обмітання, ρ – густина повітря, v – швидкість повітря

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ЛЗ</i>	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рух ротора та ВГ. Стан руху ротора та вітрогенератора залежить від його кінематичних та динамічних характеристик. Цей рух має кілька основних аспектів, таких як обертання ротора навколо своєї вісі, створення електричної енергії за допомогою генератора.

Рух ротора може бути описаний як коливальний рух навколо горизонтальної або вертикальної осі. Для досягнення максимального збору вітроенергії, вона може регулюватися за допомогою систем керування, які контролюють потрібний кут нахилу лопатей. Після цього рух двигуна спричиняє обертання генератора, який перетворює механічну енергію вітру в електричну. Генерація електричної енергії при обертанні ротора забезпечується шляхом описання рухом генератора як обертаючого валу. Згенеровану електричну енергію можна підключити до мережі або зберегти для майбутнього застосування.

Регулювання рухом ротора та ВГ максимізує його ефективність і покращує вироблення електроенергії шляхом використання доступного потенціалу вітру.

Взаємодія з вітром. Взаємодія між ВГ і вітром передбачає ряд аеродинамічних і механічних процесів, що відбуваються під час використання та збору енергії для генерації.

- *Захоплення енергії вітру:* Лопаті ВГ вбирають кінетичну енергію повітря і перетворюють її на механічну енергію обертання ротора.
- *Аеродинамічні сили та моменти:* Вітрові лопаті створюють аеродинамічні сили та моменти, які сприяють обертанню навколо ротора. Сили залежать від швидкості вітру, кута нахилу лопатей та їх геометричних параметрів.
- *Керування кутом нахилу лопатей:* Для досягнення максимального збору вітроенергії, кут нахилу лопатей адаптується під зміни умов вітру. Шляхи автоматичного виконання цього полягають у використанні систем керування, що аналізують швидкість та напрям вітру [18].

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *Використання генератора:* Обертання ротора ВГ генерує механічну енергію, яка подається до генератора. Генератор перетворює цю енергію в електричну енергію, яка потім може бути використана для життєвих потреб або постачена до електричної мережі.

3.2. Динамічна модель вітроенергетичної установки

Динамічна модель ВГ описує поведінку системи з урахуванням різних фізичних процесів, яким піддається. Завдяки цій моделі можна аналізувати і прогнозувати реакцію ВГ на зміни умов повітряного потоку, навантаження на електромережу тощо [19].

Основні складові динамічної моделі ВГ включають:

- Механічну систему ротора;
- Електричну систему ротора;
- Керування та регулювання;
- Метеорологічні умови.

Механічна система ротора. Ключовою складовою ВГ є система ротора, яка перетворює кінетичну енергію вітру на механічну роботу, а потім в електричну через генератор.

Ось деякі основні елементи та характеристики механічної системи ротора:

- Ротор: Основна частина ВГ, що обертається під дією вітру. Складається з лопатей, які використовують кінетичну енергію вітру. Залежно від моделі, виробника та характеристик вітрових умов, можуть бути різними форми та конструкції лопатей.
- Вал: елемент, навколо якого обертається ротор. Передає механічну енергію від ротора до генератора. Вал повинен мати достатню міцність і стійкість, оскільки на нього дуже сильно впливає механічне навантаження.

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- Редуктор(мультиплексор): Деякі ВГ оснащено пристроєм, що збільшує або зменшує обертальний момент, що передається від ротора до генератора. Це може бути гідродинамічна система або коробка передач.
- Генератор: У кінці валу зазвичай розміщується генератор, який перетворює механічну енергію в електричний струм. ВГ може бути синхронним або асинхронним, залежно від типу генератора.
- Система керування та контролю: Механічна система ротора може бути обладнена управляючо-контрольною системою, яка впливає на швидкість обертання ротора і оптимізує функціонування вітрогенератора.

Електрична система ротора. Перетворення механічної енергії, що генерується ротором вітрогенератора, виконується за допомогою електричної системи. Ця система відповідає за перетворення механічної енергії в електричну, яку в подальшому використовують для живлення приладів тощо.

Ключові компоненти та характеристики електричної системи:

- *Регулятор напруги та потужності:* Електричний вихід генератора стабілізується регулятором напруги та потужності, що контролює його. Також, він здатний взаємодіяти з системою керування вітрогенератором для оптимізації його роботи, враховуючи параметри швидкості вітру.
- *Трансформатор:* Трансформатор є пристроєм, який може змінювати напругу електричного сигналу генератора для відповідності до рівня напруги у мережі або споживача.
- *Електрична мережа:* Вихідний електричний сигнал з генератора може бути підключений до електричної мережі або системи живлення, де використовується для живлення споживачів.
- *Система контролю та моніторингу:* ВГ може мати встановлену систему контролю та моніторингу електричної системи, яка стежить за роботою генератора, виявляє будь-які невідповідності, що впливають на ефективність.

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- *Керування та регулювання.* Система керування та регулювання вітрогенератора відповідає за оптимізацію його роботи з урахуванням змінних умов вітру та навантаження на електричну мережу.

Основні аспекти керування та регулювання ВГ [19]:

- *Максимізація виробництва електроенергії:* стежить за швидкістю вітру та електричним навантаженням на ВГ. Регулює обертальну швидкість ротора для максимізації виробництва енергії.
- *Стабілізація напруги та частоти:* Контролює частоту, напругу, які генерує ВГ, з метою забезпечення стабільності електричної мережі.
- *Захист від перевантажень та аварій:* Включає в себе захисні механізми, які вимикають ВГ у разі виникнення аварійних ситуацій або перевищення допустимих меж навантаження.
- *Адаптація до змінних умов вітру:* Система оптимізує роботу ВГ для максимально використання енергії при зміні вітрових умов(швидкість, напрям, тощо).
- *Діагностика та моніторинг:* Система, що відстежує стан компонентів вітрогенератора і виявляє можливі несправності.

Метеорологічні умови. Метеорологічні умови безпосередньо впливають на доступну енергію вітру, навантаження та ефективність системи.

Ключові аспекти метеорологічних умов:

- *Швидкість та напрям вітру:* Головний фактор, що визначає доступну енергію для використання вітрогенератором.
- *Турбулентність та нерівності вітру:* можуть спричиняти коливання в роботі ротора та збільшувати швидкість зношення обладнання.
- *Температура та вологість повітря:* впливають на густину повітря, відповідно, на роботу ВГ через зміни у властивостях атмосфери.
- *Атмосферний тиск:* впливає на роботу ВГ через зміни густини повітря та кількості доступного вітру.

–

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

- *Екстремальні погодні умови:* Сильні дощі, шторми, снігопади, блискавки, надто високі пориви вітрів становлять небезпеку для ефективності вітрогенератора, тому системи потрібно постійно покращувати та адаптувати під мінливі погодні умови.

3.3 Модель системи стеження за напрямом вітру LiDAR

Модель системи стеження за напрямом вітру LiDAR поєднує в собі кінематичні та динамічні аспекти для опису руху та реакції вітрогенератора на зміни умов вітру.

Позиція та орієнтація вітрогенератора. Кінематична модель визначає координати та орієнтацію ВГ в просторі. Динамічна модель розглядає взаємодію ВГ з навколишнім середовищем, враховує рух та зміни в умовах вітру.

Швидкість та прискорення вітрогенератора. Кінематична модель визначає швидкість та прискорення руху ВГ в просторі. Динамічна модель враховує зміни в швидкості та прискоренні, спричинені дією вітру та механічними навантаженнями.

Вплив вітру та LiDAR. Обидві моделі враховують виміри вітру, отримані від системи LiDAR, для коректування руху вітрогенератора та забезпечення його оптимальної роботи.

Управління та корекція руху. Динамічна модель включає систему керування, яка реагує на зміни вітру та використовує дані LiDAR для корекції руху ВГ. Кінематична модель визначає оптимальну траєкторію руху ВГ з урахуванням змін умов вітру та вимог ефективного використання енергії вітру.

Кінематична модель описує рух частин ВГ під впливом потоків вітру, а саме, як ВГ орієнтується для досягнення максимальної ефективності [20].

Вимірювання напрямку та швидкості вітру. Система LiDAR вимірює швидкість та напрям вітру шляхом випромінювання лазерних променів/імпульсів та збирання відбитих в атмосфері сигналів.

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Визначення швидкості вітру та його кута відносно ВГ дозволяє обчислити ефективність роботи ВГ.

Обчислення ефективності роботи. формула для обчислення ефективності роботи вітрогенератора має наступний вигляд:

$$\eta_1 = \cos^3(a), \text{ де}$$

a – кут між напрямом вітру та площиною ротора вітрогенератора.

Динамічна модель системи стеження LiDAR описує зміни в стані системи в часі, що характеризується змінами та корегуванням положенням лопатей та ротору відповідно до вітрових умов [20].

Рух ротора і лопатей. Динамічні рівняння, що описують рух ротора і лопатей можна описати так:

$$J * \omega' = M_v - M_g, \text{ де}$$

J – інерційний момент ротора, ω' – кутова швидкість ротора, M_v – момент сили від вітру, M_g – момент сили від генератора.

Визначення потужності вітрогенератора. Потужність вітрогенератора визначається як функція від потужності, яку він міг би виробляти при оптимальних умовах та ефективності:

$$P = P_{vey} * \eta, \text{ де}$$

P_{vey} – номінальна потужність, η – ефективність роботи.

Визначення зміни ефективності ВГ. Відносна зміна ефективності дозволяє оцінити, як змінюється ефективність роботи вітрогенератора при зміні умов:

$$\Delta \eta = \left(\frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} \right) * 100, \text{ де}$$

η_1 – початкова ефективність, η_2 – ефективність після змін/вдосконалення.

Висновки до розділу 3

Математична модель системи стеження за напрямом вітру LiDAR дозволяє точно оцінювати та оптимізувати роботу ВГ. Використання кінематичних та динамічних моделей забезпечує розуміння поведінки системи в різних умовах і допомагає підвищити ефективність виробництва електроенергії.

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Формули, представлені в цій моделі, є ключовими для оцінки ефективності, визначення потужності та аналізу відносних змін у роботі системи.

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ЛЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>38</i>

РОЗДІЛ 4.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ

4.1. Розрахунки вітроенергетичної установки

Початкові дані ВЕУ для проведення розрахунків:

Номінальна потужність – 50 кВт;

Діаметр ротора – 19,2 м;

Поріг початку роботи – 3 м/с;

Макс. швидкість вітру за якої ВЕУ працює – 35 м/с.

Густина повітря, $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$

Згідно наданої інформації проведемо розрахунки:

Площа обмітання, S:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S = \frac{3,14 \cdot 19,2^2}{4} = 289,38 \text{ м}^2$$

Потужність, що розвивається вітроколесом, P [21]:

$$P = C_p \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{v_0^3}{2}, \text{ де}$$

v_0 – швидкість вітру, ρ – густина повітря, C_p – коефіцієнт потужності (візьмемо середнє значення 0,45) [21];

Потужність вітроколеса за мінімальної швидкості вітру (3 м/с):

$$P = 0,45 \cdot 289,38 \cdot 1,225 \cdot \frac{3^3}{2} = 2153,5 \text{ Вт} = 2,1 \text{ кВт або } 0,002 \text{ МВт.}$$

Потужність вітроколеса за максимальної швидкості вітру (35 м/с):

$$P = 0,45 \cdot 289,38 \cdot 1,225 \cdot \frac{35^3}{2} = 3419725,54 \text{ Вт} = 3419,7 \text{ кВт або } 3,4 \text{ МВт.}$$

					<i>ДПБ.ПМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Логвиненко О.О.			Літера	Аркиви	Архивів		
Перевір.		Писарець А.В.				39	49		
Реценз.					<i>РОЗДІЛ 4</i>				
Н. Контр.				<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>					
Затверд.		Писарець А.В.							

4.2. Розрахунок об'єму та маси лопаті

Вихідні дані:

Довжина лопаті, $L = 8,35$ м;

Висота, $H = 0,5$ м;

Ширина, $W = 1$ м;

Товщина стінки $= 0,1$ м;

Густина матеріалу $- \rho = 2640 \text{ кг/м}^3$

Розрахуємо зовнішній та внутрішній об'єми

Зовнішній:

$$V1 = 8,35 * 1 * 0,5 = 4,175 \text{ м}^3$$

Внутрішній:

$$L = 8,35 - 2 * 0,1 = 8,15 \text{ м}$$

$$W = 1 - 2 * 0,1 = 0,8 \text{ м}$$

$$H = 0,5 - 2 * 0,1 = 0,3 \text{ м}$$

$$V2 = 8,15 * 0,8 * 0,3 = 1,956 \text{ м}^3$$

Визначимо загальний об'єм лопаті:

$$V = V1 - V2$$

$$V = 4,175 - 1,956 = 2,219 \text{ м}^3$$

Маса однієї лопаті:

$$M1 = 2,219 * 2640 = 5857,16 \text{ кг}$$

Відповідно, маса трьох лопатей:

$$iM = 5857,16 * 3 = 17571,48 \text{ кг}$$

4.3. Розрахунок максимального крутного моменту та діаметру валу

Визначити максимально крутний момент можна за допомогою формули:

$$T = \frac{P_{max}}{\omega}, \text{ де}$$

P_{max} – потужність за максимальної швидкості вітру, ω – кутова швидкість.

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ІЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

В нашому випадку максимальна швидкість вітру становить 35 м/с, відповідно,
 $P_{\max} = 3419725,54 \text{ Вт}$

Кутова швидкість розраховується за формулою:

$$\omega = 2\pi * n, \text{ де}$$

n – частота обертання ротора.

Середній показник n для вітрогенераторів даного типу становить 15-20 об/хв при максимальній швидкості.

$$n = \frac{20}{60} = 0,33 \text{ об/с,}$$

$$\omega = 2 * 3,14 * 0,33 = 2,07 \text{ рад/с}$$

Максимально крутний момент:

$$T = \frac{3419725,54}{2,07} = 1652041,32 \text{ Н/м}$$

Для розрахунку діаметру валу використаємо формулу кручення круглого валу:

$$d = \left(\frac{16T}{\pi\tau}\right)^{\frac{1}{3}}, \text{ де}$$

τ – допустиме напруження на зсув для матеріалу валу (для сталі це значення 50 МПа або 50000000 Па).

$$d = \left(\frac{16 * 1652041,32}{3,14 * 50000000}\right)^{\frac{1}{3}},$$

$$d = \left(\frac{26432661,1}{157000000}\right)^{\frac{1}{3}},$$

$$d = (0,16)^{\frac{1}{3}},$$

$$d = 0,55 \text{ м,}$$

Отже, для максимальної потужності в 3419725,54 Вт або 3419,72 кВт діаметр валу повинен бути $\approx 0,55$ м, щоб витримати максимально крутний момент в $1652041,32 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ або $1652,04 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ЛЗ</i>	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.4. Розрахунки системи стеження за напрямом вітру

Приклад розрахунків для порівняння ефективності системи до та після удосконалення.

При похибці 0° система працює ідеально, кут між напрямом вітру та віссю обертання 90° .

Для вимірювання звичайної системи стеження візьмемо похибку $a_1 = 5^\circ$, тобто, кут між напрямом вітру та віссю обертання становить 85° (рис. 2.4).

Після вдосконалення системи, за рахунок збільшення кількості хвиль маємо більшу точність, тому похибка вимірювань становить, $a_2 = 2^\circ$, відповідно, кут становить 88° (рис. 2.4).

$$1^\circ = 0,0174 \text{ рад};$$

$$a_1 = 5^\circ = 0,087 \text{ рад}, a_2 = 2^\circ = 0,034 \text{ рад};$$

Обчислення ефективності роботи до та після удосконалення.

До:

$$\eta_1 = \cos^3(a_1);$$

$$\eta_1 = \cos^3(0,087) = 0,9886 \text{ або } 98,86\%.$$

Після:

$$\eta_2(t) = \cos^3(a_2);$$

$$\eta_2 = \cos^3(0,034) = 0,9982 \text{ або } 99,82\%.$$

Визначимо потужність вітрогенератора до та після удосконалення системи.

До:

$$P_1 = P_{\text{вев}} * \eta_1 = 50 \text{ кВт} * 0,9886 = 49,43 \text{ кВт}.$$

Після:

$$P_2 = P_{\text{вев}} * \eta_2 = 50 \text{ кВт} * 0,9982 = 49,91 \text{ кВт}.$$

Різниця:

$$\Delta P = 49,91 - 49,43 = 0,48 \text{ кВт}.$$

Обчислимо відносну зміну ефективності роботи ВЕУ внаслідок вдосконалення:

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$\Delta \eta = \left(\frac{\eta^2 - \eta^1}{\eta^1} \right) * 100;$$

$$\Delta \eta = \left(\frac{0,9982 - 0,9886}{0,9886} \right) * 100 = 0,971\%.$$

Зменшивши похибку з 5° до 2° маємо збільшення ефективності роботи системи на 0,971% та зростання потужності ВЕУ на 0,48 кВт.

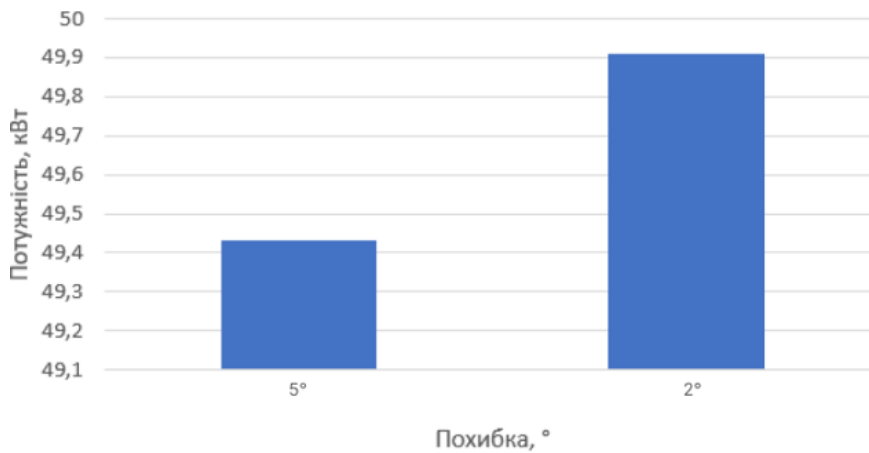


Рис. 4.1. Діаграма зростання потужності до та після вдосконалення системи

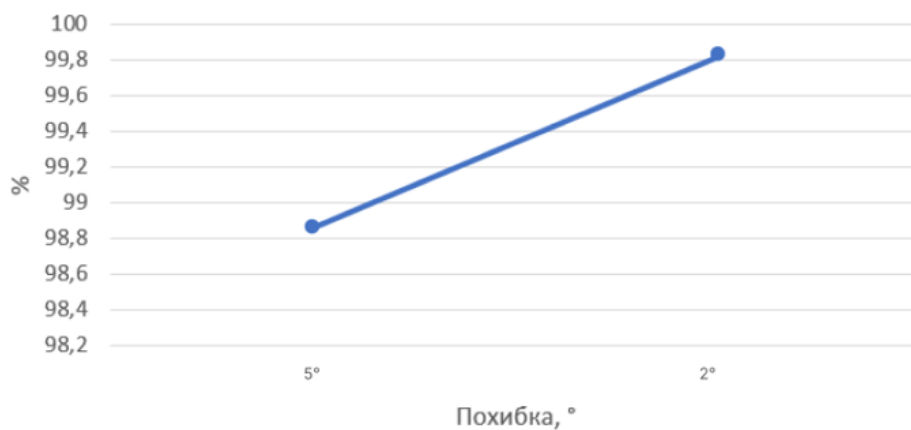


Рис. 4.2. Графік збільшення ефективності після вдосконалення системи

4.5. Розрахунок потужності ВЕУ залежно від швидкості вітру

Проведемо розрахунки для таких значень швидкості вітру: 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35 м/с. (див. Додаток А).

Формула для розрахунку потужності вітроустановки [22]

$$P = C_p * S * \rho * \frac{v^3}{2}, \text{ де}$$

C_p – коефіцієнт потужності, $C_p = 0,45$, S – площа обмітання, $S = 289,38 \text{ м}^2$, ρ – густина повітря, $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$, v – швидкість повітря.

Згідно отриманих даних побудуємо графік залежності потужності ВЕУ від швидкості вітру (рис. 4.3):

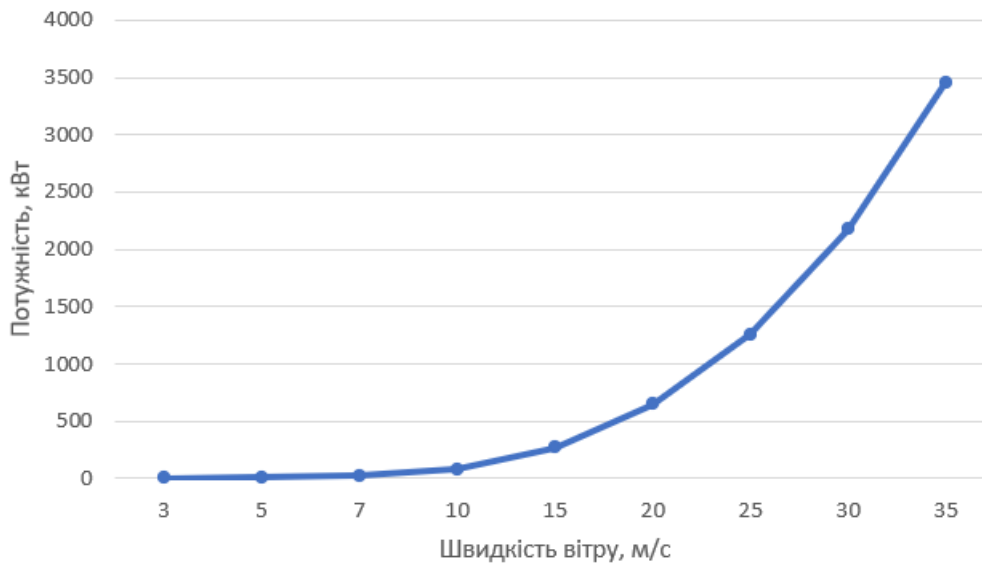


Рис. 4.3. Графік залежності потужності від швидкості вітру до вдосконалення системи

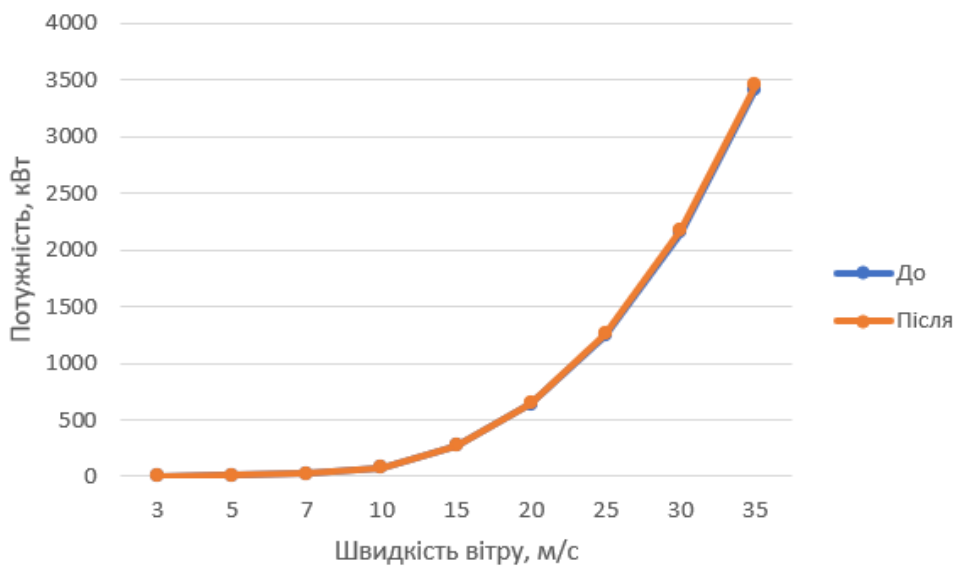


Рис. 4.4. Графіки залежності потужності від швидкості вітру до/після вдосконалення

4.6. Розрахунок виробленої енергії в залежності від швидкості вітру

Розглянемо кількість виготовленої енергії вітроенергетичною установкою до та після удосконалення.

Формула для обчислення виробленої енергії за Т період часу:

$$E = P * T, \text{ де}$$

P – потужність, T – час;

Розглянемо декілька прикладів розрахунків [22]:

Період часу за який виготовлено енергію – 12 годин;

Швидкість вітру – 5, 10, 15 м/с;

Ефективність роботи до та після удосконалення $\eta_1 = 0,9886$, $\eta_2 = 0,9982$.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 * \eta$$

Розрахунок потужності до вдосконалення($\eta_1 = 0,9886$):

Швидкість вітру 5 м/с:

$$P_1 = \frac{1}{2} * 1,225 * 289,38 * 5^3 * 0,9886 = 21,9 \text{ кВт},$$

Швидкість вітру 10 м/с:

$$P_2 = \frac{1}{2} * 1,225 * 289,38 * 10^3 * 0,9886 = 175,22 \text{ кВт},$$

Швидкість вітру 15 м/с:

$$P_3 = \frac{1}{2} * 1,225 * 289,38 * 15^3 * 0,9886 = 591,38 \text{ кВт},$$

Розрахунок потужності після вдосконалення($\eta_2 = 0,9982$):

Швидкість вітру 5 м/с:

$$P_1' = \frac{1}{2} * 1,225 * 289,38 * 5^3 * 0,9982 = 22,11 \text{ кВт},$$

Швидкість вітру 10 м/с:

$$P_2' = \frac{1}{2} * 1,225 * 289,38 * 10^3 * 0,9982 = 176,92 \text{ кВт},$$

Швидкість вітру 15 м/с:

$$P_3' = \frac{1}{2} * 1,225 * 289,38 * 15^3 * 0,9982 = 597,12 \text{ кВт},$$

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ІЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Розрахунок енергії до вдосконалення:

$$E1 = P1 * T = 21,9 * 12 = 262,8 \text{ кВт/год,}$$

$$E2 = P2 * T = 175,22 * 12 = 2102,64 \text{ кВт/год,}$$

$$E3 = P3 * T = 591,38 * 12 = 7096,56 \text{ кВт/год,}$$

Загальна кількість виробленої енергії до вдосконалення:

$$E = 262,8 + 2102,64 + 7096,56 = 9462 \text{ кВт/год.}$$

Розрахунок енергії після вдосконалення:

$$E1' = P1' * T = 22,11 * 12 = 265,32 \text{ кВт/год,}$$

$$E2' = P2' * T = 176,92 * 12 = 2123,04 \text{ кВт/год,}$$

$$E3' = P3' * T = 597,12 * 12 = 7165,44 \text{ кВт/год,}$$

Загальна кількість виробленої енергії після вдосконалення:

$$E = 265,32 + 2123,04 + 7165,44 = 9553,8 \text{ кВт/год.}$$

Загалом, кількість виробленої енергії за 12 годин збільшилось з 9462 кВт/год до 9553,8 кВт/год.

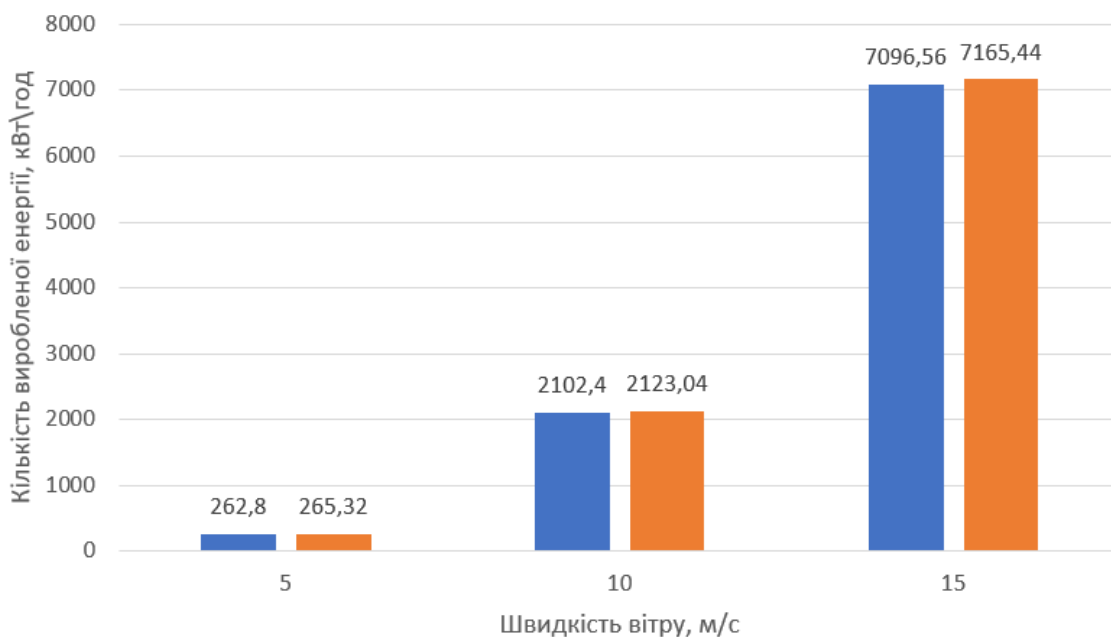


Рис. 4.5. Діаграма загальної кількості виробленої енергії після вдосконалення

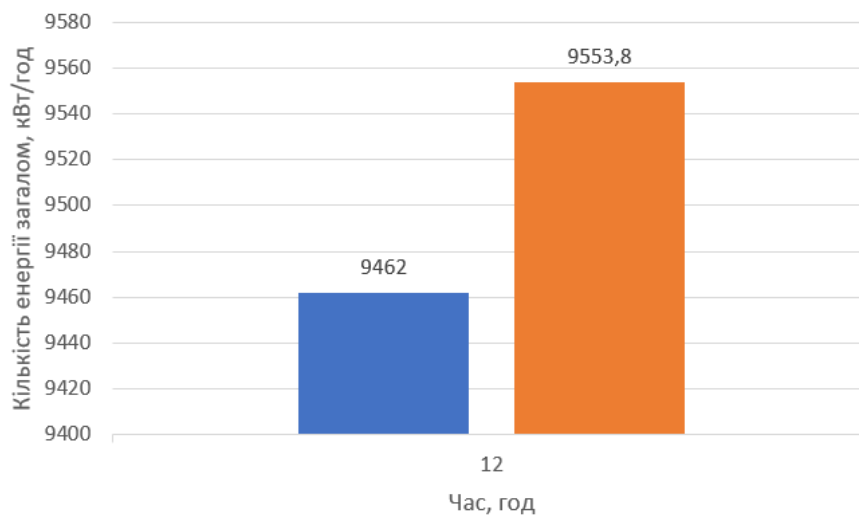


Рис. 4.6. Діаграма загальної кількості виробленої за 12 годин після вдосконалення

Висновки до розділу 4

В результаті проведених розрахунків було виявлено покращення ефективності системи стеження за напрямом вітру ВЕУ після впровадження методу багатохвильового випромінювання. Потужність ВЕУ після удосконалення зросла на 0,48 кВт, що свідчить про збільшення її продуктивності на 0,971%.

Це підтверджує ефективність використання нової технології у системах стеження за напрямом вітру, яка дозволяє отримувати більш точні дані про швидкість та напрям вітру, що в свою чергу призводить до підвищення ефективності роботи ВЕУ.

Такий результат свідчить про важливість вдосконалення систем стеження за напрямом вітру для підвищення продуктивності та стабільності вітроенергетичних установок.

ВИСНОВКИ

Головний зміст отриманих у роботі результатів досліджень може бути окреслений наступним.

1. Узагальнено відомості про сучасний стан вітроенергетичних установок: принцип дії, класифікацію, особливості роботи. Здійснено порівняльний аналіз характеристик вертикально- та горизонтально-осьових вітроустановок. Виявлено, що основним недоліком останніх є наявність системи стеження за напрямом вітру.

2. Розглянуто загальну будову вітроенергетичних установок та функції її елементів; методи орієнтації на напрям вітру; запропоновано структурну схему установки із застосуванням системи стеження з лазерним випромінюванням LiDAR.

3. Наведено описи кінематичної та динамічної моделей вітроенергетичної установки, що дозволяють зрозуміти поведінку системи за різних умов.

4. Розраховано потужність вітроустановки та виробленої енергії залежно від швидкості вітру.

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Вітроенергетика – практичні аспекти і перспективи. [Електронний ресурс]
URL: <https://agro-business.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/2081-vitroenerhetyka-praktychni-aspekty-i-perspektyvy.html>
- [2] Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Циленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. [Електронний ресурс] URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf>
- [3] Вітроенергетичні установки (ВЕУ), пристрій та принцип роботи. [Електронний ресурс] URL: <https://greenwindukraine.com.ua/vitroenerhetychni-ustanovky-prystriy-ta-pryntsy-p-roboty/>
- [4] Принцип роботи вітрогенератора. [Електронний ресурс] URL: <https://vencon.ua/ua/articles/printsip-raboty-vetrogeneratora>
- [5] Energy Education, Wind Power. [Електронний ресурс] URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind_power#:~:text=Between%20the%20cut%2Din%20speed,important%20factor%20for%20wind%20power.
- [6] Вертикальные ветрогенераторы Украина. [Електронний ресурс] URL: <http://altenergo.biz/vetrogenerator/>
- [7] Основи проектування систем енергозбереження: Методичні вказівки до проведення практичних занять для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», професійного спрямування «Прилади і системи точної механіки» та «Інформаційні технології в приладобудуванні» // Уклад.: А. В. Писарець, І. В. Коробко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 55 с
- [8] Міністерство освіти і науки України. Вітрова енергетика. Основи вітрової енергетики. [Електронний ресурс] URL: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/61270/32/7ВІТРОВА%20ЕНЕРГЕТИКА.pdf>

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- [9] Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів. Вітрогенератор. [Електронний ресурс] URL: <https://cemsc.vntu.edu.ua/?p=508>
- [10] Українська Енергетика. [Електронний ресурс] URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/holova-uvea-vitroenerhetyka-u-2022-r-dodast-blyzko-1-hvt-potuzhnosti>
- [11] В.М. Корендій, Р.В. Зінько, Аналіз переваг і недоліків горизонтально-осьових вітроустановок, Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2012. - № 729. – С. 53-58. [Електронний ресурс] URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4790/10.pdf>
- [12] Типи вітрових електростанцій (ВЕС) та їх різниця. [Електронний ресурс] URL: <https://iknet.com.ua/uk/article/types-of-WPP>
- [13] В.М. Корендій, Аналіз систем орієнтації вітроколос. Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». [Електронний ресурс] URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/4e864af0-feab-4870-b96d-765c9e51bb21/content>
- [14] Introduction to Remote Wind Measurement LiDARS. [Електронний ресурс] URL: <https://medium.com/@satrobit/introduction-to-remote-wind-measurement-lidars-d785d7cd3023>
- [15] LiDAR-Enhanced Wind Turbine Control: Past, Present and Future. [Електронний ресурс] URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65879.pdf>
- [16] LiDAR technology mated with wind energy quickly becoming and industry standard. [Електронний ресурс] URL: <https://www.powermag.com/lidar-technology-mated-with-wind-energy-quickly-becoming-an-industry-standard-2/>
- [17] How LiDAR extends to life over 50 wind farms. [Електронний ресурс] URL: <https://www.windpowerengineering.com/how-lidar-extends-the-life-of-over-50-wind-farms/>
- [18] Wind energy – energypedia. [Електронний ресурс] URL: https://energypedia.info/wiki/Wind_Energy_-_Introduction

					<i>ДПБ.ЛІМ-01.14.1760.00.000.ІІЗ</i>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- [19] Dynamic models for Wind Turbines and Wind Power Plants. [Електронний ресурс] URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52780.pdf>
- [20] LiDAR Measurements and Engineering Modeling of Wind Turbine Wakes. [Електронний ресурс] URL: https://oops.uni-oldenburg.de/4671/1/PhD_Thesis_Trabucchi_2019_to_print_v2.pdf
- [21] Power Factor. Коэффициент мощности. [Електронний ресурс] URL: <https://ledfactor.ua/page/power-factor>
- [22] Зелена енергія. Підвищення енергоефективності для комплексної енергетичної установки по комбінованому виробництву електроенергії тепла та холоду під час пікових навантажень на підприємстві. [Електронний ресурс] URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/%D0%97%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0-%D0%95%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%8F.pdf>

					<i>ДПБ.ЛМ-01.14.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51