

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

Центр перепідготовки та післядипломної освіти

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ
ПОШКОДЖЕННЯ ВІТРОВИХ ТУРБІН**

Виконав студент 2 курсу, групи ЕТмд-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

<u>Горlachук М.А.</u>
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник

<u>Коваль В.П.</u>
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

<u>Мовчан Л.Т.</u>
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

<u>Коваль В.П.</u>
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент

<u>Микитишин А.Г.</u>
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

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

Факультет _____ центр перепідготовки та післядипломної освіти

(повна назва факультету)

Кафедра _____ електричної інженерії

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня _____ *магістр*

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студенту _____ *Горлачуку Миколі Анатолійовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ *Розробка рекомендацій для попередження пошкодження вітрових турбін*

Керівник роботи _____ *к.т.н., доц. Коваль В.П.*

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

Затверджені наказом ректора від «10» жовтня 2024 року № 4/7-985.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 23.12.2024

3. Вихідні дані до роботи Вітрові турбіни працюють як на морі так і на суші в різних погодних умовах

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

1. Компоненти вітрогенератора

2. Аналіз несправностей вітрових турбін

3. Дослідження причин та наслідків пошкоджень вітрогенераторів

4. Методика аналізу та оцінки даних

5. Аналіз та результати досліджень

6. Розробка рекомендацій для попередження пошкодження вітрових турбін

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

1. Класифікація вітрогенераторів

2. Компоненти вітрової турбіни

3. Відцентрова, інерційна та сила ваги при трьох положеннях лопаті

4. Аналіз несправностей вітрових турбін

5. Наслідки пошкодження вітрогенераторів

6. Відсоток відмов

7. Причини виходу з ладу лопатей

8. Причини відмов генератора

9. Причини аварій конструкції

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 11.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 01.11.2024	
		по 07.11.2024	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки	з 08.11.2024	
	кваліфікаційної роботи	по 05.12.2024	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	з 06.12.2024	
		по 08.12.2024	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 09.12.2024	
		по 10.12.2024	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 11.12.2024	
		по 12.12.2024	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу	з 12.12.2024	
	кваліфікаційної роботи	по 14.12.2024	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 14.12.2024	
		по 20.12.2024	

Студент

(підпис)

Горлачук М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 72 сторінки, __ аркушів презентації, 30 ілюстрацій, 3 таблиці та 19 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес роботи вітрової турбіни та вплив експлуатаційних факторів на нього.

Предмет дослідження – вітрова турбіна.

Метою кваліфікаційної роботи є: оцінка та аналіз пошкоджень вітрових турбін та розробка рекомендації, які можуть бути вжиті для зменшення кількості їх відмов та пошкоджень

У роботі проаналізовано будову вітрогенератора, призначення та особливості його ключових компонентів. Проведено аналіз можливих несправностей лопатей, генератора, системи riskання та редуктора і розглянуто вплив температури, льоду на лопатях, конструкційних дефектів, блискавки та інших змін навколишнього середовища на роботу вітрогенератора. Наведено результат теоретичного дослідження пошкоджень вітрових турбін. Розроблено рекомендації, які можуть бути вжиті для зменшення відмов та їх наслідків і пошкоджень

Ключові слова: ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОВА ТУРБІНА, ШВИДКІСТЬ ВІТРУ, ПОШКОДЖЕННЯ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Класифікація вітрогенераторів	8
1.2 Компоненти вітрогенератора	10
1.2.1 Загальна будова вітрогенератора.....	10
1.2.2 Фундамент (основа)	11
1.2.3 Вежа.....	11
1.2.4 Ротор.....	11
1.2.5 Гондола.....	12
1.2.6 Генератор	12
1.3 Морські та наземні вітрові турбіни.....	14
1.4 Порівняння морських та наземних вітрових турбін.....	16
1.5 Висновки до розділу	17
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	18
2.1 Аналіз навантажень, які діють на конструкцію ротора турбіни.....	18
2.2 Аеродинамічні навантаження на лопать.....	20
2.3 Механічні вібрації лопатей	23
2.4 Стійність редуктора до змінних навантажень.....	25
2.5 Навантаження, які діють на конструкцію вежі	26
2.6 Аналіз несправностей	27
2.6.1 Несправності лопатей	28
2.6.2 Збої в роботі генератора	28
2.6.3 Збої в роботі системи рискання	29
2.6.4 Несправності редуктора (коробки передач)	29
2.6.5 Вплив температури та змін навколишнього середовища.....	30

2.6.6 Блискавка	31
2.6.7 Утворення льоду на лопатях	32
2.6.8 Конструкційні дефекти.....	33
2.7 Висновки до розділу	34
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	36
3.1 Дослідження причин та наслідків пошкоджень вітрогенераторів	36
3.2 Методика аналізу та оцінки даних	45
3.3 Аналіз та результати досліджень.....	46
3.4 Розробка рекомендацій для попередження пошкодження вітрових турбін	57
3.5 Висновки до розділу	61
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	63
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	63
4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання	64
4.3 Особливості проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при ліквідації наслідків великих виробничих аварій і катастроф.....	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	69

ВСТУП

Актуальність теми. Енергія формує наше життя і Землю. Енергія, яка спочатку використовувалася людьми лише для життєво важливих і базових потреб, є наріжним каменем цивілізації, потреба в якій у сучасному світі постійно зростає. Стрімке зростання попиту на енергію та неминучий негативний вплив на навколишнє середовище, спричинений виробництвом енергії, зробили технології відновлюваної енергетики все більш важливими та переважними серед широко використовуваних джерел енергії в останні десятиліття. Вітроенергетика є однією з провідних технологій відновлюваної енергетики. Коли мова заходить про відновлювану енергетику, вітроенергетика спадає на думку, оскільки це безвуглецева, екологічно чиста, конкурентоспроможна технологія. Крок вперед у виробництві вітрової енергії - це морські та наземні вітрові турбіни з їх численними перевагами.

Сьогодні зростаючі потреби в енергії у світі та нові пошуки, пов'язані з цим, роблять наземні та морські вітрові турбіни все більш поширеним джерелом відновлюваної енергії. Однак, з цим поширенням виникають проблеми, пов'язані з експлуатаційними фазами або з міцністю вітрових турбін. Потенційні збої повинні бути відомі заздалегідь, щоб їх можна було ефективно усунути. Пошкодження і відмови негативно впливають на продовження експлуатації і спричиняють матеріальні та моральні збитки.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: оцінка та аналіз пошкоджень вітрових турбін та розробка рекомендації, які можуть бути вжиті для зменшення кількості їх відмов та пошкоджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізовано будову вітрогенератора.
2. Провести аналіз можливих несправностей лопатей, генератора, редуктора та конструкційних елементів.
3. Дослідити, на основі аналізу даних з інтернет джерел, пошкодження і відмови, які можуть виникнути у вітрогенераторах.

4. Розробити рекомендації, які можуть бути вжиті для зменшення відмов та їх наслідків.

Об'єкт дослідження – процес роботи вітрової турбіни та вплив експлуатаційних факторів на нього.

Предмет дослідження – вітрова турбіна.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток аналіз можливих несправностей лопатей, генератора та редуктора і розглянуто вплив температури, льоду на лопатях, конструкційних дефектів, блискавки та інших змін навколишнього середовища на роботу вітрогенератора.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено рекомендації, які можуть бути вжиті для зменшення відмов та їх наслідків і пошкоджень: відмов лопатей, виходу з ладу генератора, руйнування конструкції, відмова редуктора, удар блискавки та вплив температури.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 груд. 2024 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (19 найменувань). Загальний обсяг текстової частини – 72 сторінок, 3 таблиці, 30 рисунків.

Робота оформлена відповідно до методичних рекомендацій [2].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Класифікація вітрогенераторів

Вітрогенератор – це машина, яка перетворює енергію вітру в електроенергію. Її також можна назвати модифікованою версією вітряків, які перетворюють енергію вітру в механічну енергію. Як генератори електроенергії, вітрогенератори підключаються до електромережі. Ці мережі можуть бути використовуватися для зарядки акумуляторів, енергосистемою домашнього масштабу, ізольованою мережею або мережею загального користування. Перетворення енергії у вітрогенераторах відбувається у вигляді перетворення основної аеродинамічної сили в механічну енергію, а потім в електричну за допомогою генератора, шляхом прикладання крутного моменту до обертового валу через лопаті.

Стало можливим виробляти електроенергію з вітрових турбін від кВт до МВт. Як правило, вітрові турбіни вловлюють від 20% до 40% енергії вітру. Чим краща ефективність лопатей, тим більшу потужність можна отримати. Вітрові турбіни дуже швидко розвивалися з точки зору розмірів і виробництва електроенергії, і цей розвиток продовжується. Кількість виробленої енергії залежить від радіуса ротора.

Найпоширенішою конструкцією вітрогенератора сьогодні є вітрогенератор з горизонтальною віссю; це означає, що вісь обертання паралельна землі. Горизонтально-осьові турбіни класифікуються за напрямком ротора (за вітром і проти вітру), управлінням ротором (регулювання кроку і зупинки), кількістю лопатей (зазвичай три або дві), а також за тим, як вони змінюють напрямок за вітром (вільне ристання або активне ристання) [3-8].

Вітрові турбіни класифікуються за віссю обертання, кількістю обертів, потужністю, кількістю лопатей, вітровим ефектом, характеристиками передач та місцем встановлення [9].

Детальна схема класифікації вітрових турбін показана на рис.1.1. Загалом, вітрові турбіни класифікуються за осями обертання, але також існують класифікації за частотою обертання, потужністю, кількістю лопатей і т.д.

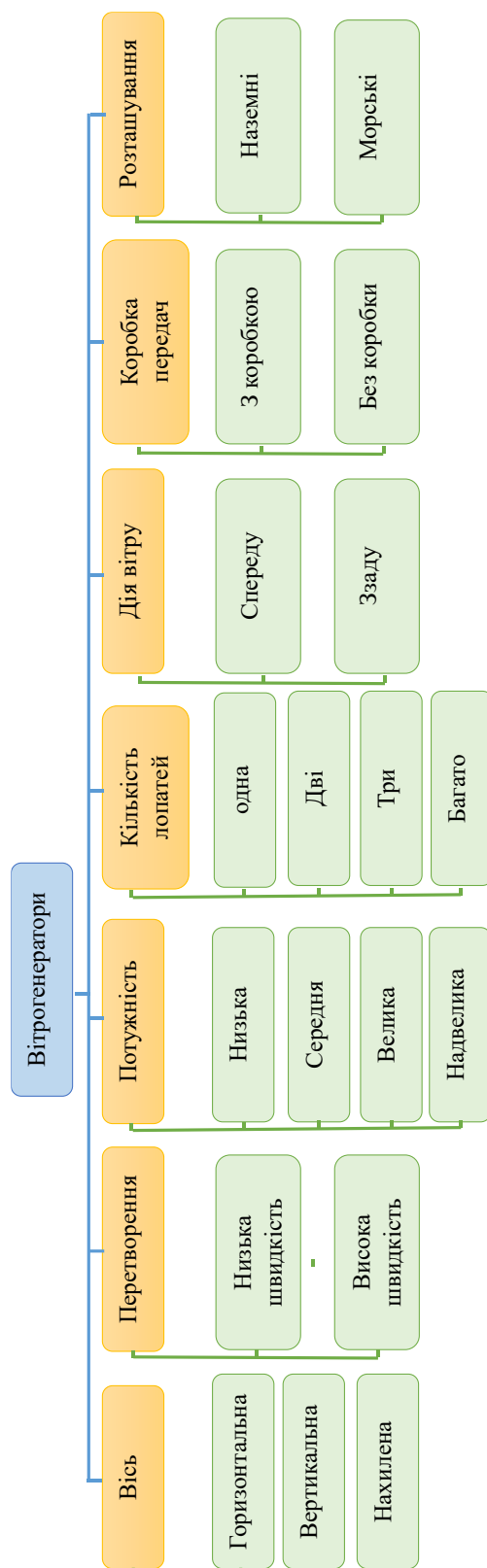


Рисунок 1.1 – Класифікація вітрогенераторів

1.2 Компоненти вітрогенератора

1.2.1 Загальна будова вітрогенератора

Великі вітрові турбіни, які найчастіше використовуються для постачання електроенергії в мережу, варіюються від 250 кіловат до величезних установок потужністю від 3,5 до 5 МВт, які використовуються в морських зонах. Турбіни для комунальних підприємств зазвичай розміщують групами або рядами, щоб скористатися перевагами найкращих вітрових напрямків. Такі вітрові "ферми" можуть складатися з декількох або сотень турбін, забезпечуючи достатню потужність для десятків тисяч будинків.

Ззовні горизонтально-осьові вітрогенератори складаються з трьох великих частин: вежі, лопатей і коробки за лопатями, яка називається гондолою [10-12]. Усередині гондоли рух перетворюється на електроенергію. Великі турбіни не мають хвостових вентиляторів, натомість вони мають гідравлічне управління, яке орієнтує лопаті за вітром.

У найбільш типовому виконанні лопаті прикріплені до осі, яка з'єднана з редуктором. Редуктор, або трансмісія, збільшує швидкість обертання приблизно з 50 об/хв до 1800 об/хв. Швидше обертаючись, вал обертається всередині генератора, виробляючи електроенергію змінного струму. Електроенергія повинна вироблятися з потрібною частотою і напругою, щоб бути сумісною з електромережею. Оскільки швидкість вітру змінюється, швидкість генератора може змінюватися, спричиняючи коливання електроенергії. Одне з рішень цієї проблеми – турбіни з постійною швидкістю обертання, де лопаті пристосовуються, злегка повертаючись убік, до уповільнення при поривах вітру. Іншим рішенням є використання турбін зі змінною швидкістю, в яких лопаті і генератор змінюють швидкість відповідно до вітру, а складні регулятори потужності фіксують коливання електричної потужності. Третій підхід полягає у використанні низькошвидкісних генераторів.

Вітрогенератор складається з п'яти основних і багатьох допоміжних частин. Основними частинами є вежа, ротор, гондола, генератор і фундамент або основа. Без них вітрова турбіна не може функціонувати.

1.2.2 Фундамент (основа)

Фундамент знаходиться під землею для наземних турбін; його не видно, оскільки він покритий ґрунтом. Це великий і важкий структурований бетонний блок, який повинен утримувати всю турбіну і сили, що впливають на неї. У морських турбін основа знаходиться під водою і її не видно. У морських турбін, які знаходяться глибоко в морі, основа плаває, але вона має достатню масу, щоб витримати вагу турбіни і всі сили, які на неї впливають, а також утримувати її у вертикальному положенні.

1.2.3 Вежа

Вежа більшості сучасних турбін – це кругла сталева труба діаметром 3-4 м, висотою 75-110 м. Емпіричне правило для турбінної вежі полягає в тому, що її висота дорівнює діаметру кола, яке описують її лопаті при обертанні. Зазвичай, чим вища турбіна, тим більше вона піддається впливу вітру з більшою швидкістю. Це пояснюється тим, що чим далі ми знаходимося від землі, тим швидший вітер (вітер не має однакової швидкості на різних відстанях від землі).

1.2.4 Ротор

Ротор – це частина турбіни, що обертається; він складається (переважно) з трьох лопатей і центральної частини, до якої кріпляться лопаті – хабу. Турбіна не обов'язково повинна мати три лопаті; вона може мати дві, чотири або іншу кількість лопатей. Але трилопатевий ротор має найкращий ККД та інші

переваги. Лопаті не суцільні, вони порожнисті та виготовлені з композитного матеріалу, щоб бути легкими і міцними. Тенденція полягає в тому, щоб зробити їх більшими (для більшої потужності), легшими і міцнішими. Лопаті мають форму аеродинамічного крила (як крила літака). Крім того, вони не плоскі, а мають вигин між основою і кінчиком. Лопаті можуть повертатися на 90° навколо своєї осі, змінюючи кут захоплення вітру (атаки). Цей рух називається кроком лопаті.

1.2.5 Гондола

Гондола – це корпус на верхівці вежі, в якому розміщуються всі компоненти, які повинні знаходитися на верхівці турбіни. Існує досить багато компонентів для правильної та коректної роботи складної електромеханічної системи, якою є турбіна. Основною частиною турбіни серед цих компонентів є генератор і вал турбіни, який передає зібрану енергію від вітру до генератора через редуктор. Редуктор є життєво важливим компонентом вітрових турбін; він знаходиться в гондолі. Редуктор збільшує швидкість головного валу з приблизно 12-25 об/хв (для більшості сучасних турбін) до швидкості, необхідної для роботи генератора. З цієї причини вал з боку генератора називається "високошвидкісним валом". Оскільки турбіна повинна слідувати за вітром і підлаштовувати свою орієнтацію під напрямок вітру, її ротор повинен обертатися відносно вежі. Це обертання називається рухом рискання, при якому гондола і ротор обертаються навколо осі вежі.

1.2.6 Генератор

Генератор – це компонент, який перетворює механічну енергію ротора, отриману від вітру, в електричну енергію. Генератор має таку ж структуру, як і електродвигун. Генератор може бути синхронний або асинхронний (індукційний). Тим не менш, генератор, пов'язаний з вітровими турбінами, поки

що є асинхронним генератором, оскільки синхронний генератор повинен обертатися з чітко контрольованою постійною швидкістю (для підтримки постійної частоти). Деякі з основних компонентів вітрової турбіни зображені на рис 1.2. Оскільки генератор повинен обертатися зі швидкістю, що відповідає частоті електричної мережі (50 або 60 Гц в більшості країн), він повинен обертатися швидше, ніж ротор турбіни. Більшість генераторів потрібно обертати зі швидкістю 1500 об/хв (для 50 Гц) і 1800 об/хв (для 60 Гц). Ротор турбіни не може обертатися з такою швидкістю. Отже, редуктор повинен збільшити швидкість обертання ротора турбіни (головного валу) до швидкості, яка може бути використана генератором. Досвід показує, що редуктор в турбіні є проблемним компонентом. Це пов'язано з тим, що енергія вітру не залишається постійною протягом відносно прийнятного періоду часу. Вона безперервно коливається, через природу вітру. Це призводить до того, що зубці шестерні зазнають перевантажень і ударних навантажень, що призводить до втоми і виходу з ладу. Крім того, редуктор є важким елементом гондоли на вершині турбіни.



Рисунок 1.2 – Компоненти вітрової турбіни

1.3 Морські та наземні вітрові турбіни

Як наземні, так і морські вітроелектростанції надають два варіанти виробництва електроенергії з вітру, і для обох типів установок існують різні компроміси. Наземні вітроелектростанції є найпопулярнішим типом вітроелектростанцій у світі сьогодні, але в розвинених країнах зростає інтерес до будівництва морських вітроелектростанцій.

Морська вітроенергетика, яку також називають прибережною вітроенергетикою – це коли вітер над відкритою водою, зазвичай в океані, використовується для вироблення електроенергії. Вітрові електростанції будують на водоймах, де швидкість вітру вища. Переваги морських вітроелектростанцій можна перерахувати наступним чином:

- Вітряки можуть бути більшими і вищими, ніж їхні наземні аналоги, що дозволяє збирати більше енергії.
- Вони, як правило, знаходяться далеко в морі, а це означає, що вони набагато менше заважають, що дозволяє створювати більші ферми.
- Зазвичай у відкритому морі швидкість і сила вітру набагато вищі, що дозволяє виробляти більше енергії.
- Вітрові електростанції мають відносно нейтральний вплив на навколишнє середовище. Вони не вбудовані в судноплавні шляхи або в риболовецькі райони.
- Немає ніяких фізичних обмежень, таких як пагорби або будівлі, які могли б заблокувати потік вітру.

Загальними недоліками морських вітрових електростанцій є

- Найбільшим недоліком морської вітроелектростанції є її вартість. Морські вітроелектростанції можуть бути дорогими у будівництві та обслуговуванні, а через їхнє важкодоступне розташування вони схильні до пошкоджень від дуже швидкісних вітрів під час штормів або ураганів, які дорого відновлювати.

- Вплив морських електростанцій на морських мешканців і птахів ще не до кінця вивчений.
- Морські вітроелектростанції, які будуються ближче до берегової лінії, можуть бути непопулярними серед мешканців, оскільки це може вплинути на вартість нерухомості та туризм.



Рисунок 1.3 – Приклад морської вітроелектростанції

Наземна вітроенергетика – це турбіни, які розташовані на суші і використовують вітер для виробництва електроенергії. Вони, як правило, розташовуються на територіях з низькою природоохоронною цінністю або цінністю середовища існування. Переваги наземних вітрових турбін можна перерахувати наступним чином:

- Вартість наземних вітроелектростанцій відносно дешева, що дозволяє масово будувати вітроелектростанції.
- Менша відстань між вітряком і споживачем дозволяє зменшити падіння напруги на кабелях.
- Вітрові турбіни дуже швидко встановлюються. На відміну від атомної електростанції, будівництво якої може зайняти більше десяти років, вітрову турбіну можна побудувати за лічені місяці.

Недоліки наземних вітрових турбін полягають у наступному:

- Однією з найбільших проблем наземних вітрових електростанцій є те, що багато хто вважає, що вони псують ландшафт.
- Вони не виробляють енергію цілий рік через низьку швидкість вітру або фізичні перешкоди, такі як будівлі чи пагорби.
- Шум, який створюють вітрові турбіни, можна порівняти з шумом газонокосарки, що часто спричиняє шумове забруднення довколишніх населених пунктів.



Рисунок 1.3 – Приклад наземної вітроелектростанції

1.4 Порівняння морських та наземних вітрових турбін

Морські вітрогенератори мають багато переваг перед наземними вітрогенераторами. Крім того, існують певні труднощі в застосуванні морських вітрових турбін. Потужний вітровий потенціал на шельфі знаходиться на рівні, який може компенсувати високі витрати на встановлення та експлуатацію. Шум вітрових турбін стає нечутним через 1,5 км. Встановлення турбіни далеко від узбережжя запобігає негативним ефектам, таким як візуальний вплив і шум. На суші перешкоди створюють турбулентність перед турбіною і призводять до втрат енергії. Оскільки морські зони є широкими і безперешкодними, турбулентність знаходиться на мінімальному рівні. На суші транспортування

частин турбіни з великим діаметром ротора до місця встановлення є проблемою. Вітрові турбіни з набагато більшими діаметрами роторів можна транспортувати на море за допомогою кораблів [13].

Окрім переваг морських вітрових турбін, у них є й певні недоліки. Етап планування перед встановленням займає більше часу, ніж на суші. Дослідження морського дна і глибин є трудомісткими та дорогими операціями. Ще одним недоліком є технічне обслуговування і ремонт турбін. Час ремонту несправностей, які можуть виникнути в результаті незвичайних погодних умов, що можуть виникнути на морі, довший і дорожчий, ніж на суші. Зупинка турбін під час цього процесу означає марну трату грошей. Недоліком морських вітрових турбін, як правило, є їхня вартість. Труднощі, що виникають на етапі проектування, можна подолати за допомогою інженерних рішень, але вони також збільшують вартість. Загалом, вони повинні бути економічно життєздатними, оскільки виробляються для комерційних цілей.

1.5 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз видів вітрогенераторів та наведено їх класифікацію.
2. Проаналізовано будову вітрогенератора, призначення та особливості його ключових компонентів таких як фундамент, вежа, ротор, гондола і генератор.
3. . Розглянуто роботу вітрогенераторів при монтажі їх на суші та на морі. Встановлено, що наземні вітроелектростанції є найпопулярнішим типом вітроелектростанцій у світі сьогодні.
4. Представлено основні переваги та недоліки наземних та морських вітрогенераторів як з погляду монтажу, так і експлуатації.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз навантажень, які діють на конструкцію ротора турбіни

Потужність турбіни має пряму залежність від її розміру. Проте, зі збільшенням розміру зростає і сила вітру. Таким чином, вітротурбіна повинна бути здатна витримувати сили, яким вона піддається. Так само всі механічні частини турбіни повинні витримувати сили і навантаження, які можуть зламати ці частини, якщо вони недостатньо міцні, щоб впоратися з силами і навантаженнями, яким вони піддаються.

Сили, що діють під дією вітру на турбіну та її компоненти, можуть бути різними за величиною і характером, коли турбіна працює і коли вона зупинена. Ці сили також можуть викликати вібрації в лопатях і в башті турбіни. Вібрації є небажаними для будь-якої машини і можуть пошкодити або зламати віброуючий компонент набагато раніше, ніж очікується.

Навантаження на основні компоненти турбіни, інші механічні проблеми, такі як вібрація і втома, можуть впливати на компоненти [14].

Ротор складається з лопатей і хабу. Лопаті піддаються ряду навантажень. Хаб передає всі навантаження від лопатей на гондолу. Таким чином, зміна навантажень на хаб безпосередньо залежить від навантажень на лопаті. Хаб має оболонкову структуру (не є суцільною) і вміщує в собі механізми керування кроком лопатей. З механічної точки зору, всі сили ротора в кінцевому підсумку повинні передаватися на землю через мотогондолу і башту. Тому корпус хабу повинен бути здатним сприймати зусилля, що виникають від лопатей і передаються на мотогондолу. Навантаження від лопатей передається на хаб через ряд болтів, що утримують підшипник лопаті в машинах зі змінним кроком (в машинах з фіксованими лопатями підшипник відсутній, а лопаті прикручені безпосередньо до хабу). Таким чином, болти і підшипник між кожною лопаттю і хабом повинні сприймати навантаження. На задньому кінці хабу є ще один підшипник між ротором і мотогондолою. Оскільки ротор (вузол

хабу і лопатей) обертається відносно мотогондоли, цей підшипник повинен сприймати всі навантаження від ротора.

Для того, щоб дослідити навантаження від ротора на решту турбіни, ми розглянемо різні навантаження на лопаті. В основному це аеродинамічна сила, вага і відцентрові сили, коли турбіна працює на постійній швидкості. Під час запуску і зупинки починає діяти сила інерції. Деякі інші сили також можуть мати місце, але їх вплив може бути невеликим або лише протягом короткого періоду часу. Аеродинамічна сила – це сила вітру на лопаті турбіни. Відцентрова сила – це те, що відчуває будь-який обертовий об'єкт: це сила, що виштовхує об'єкт, який обертається навколо осі або рухається по криволінійній траєкторії. Також, щоб зробити зворотну дію – сповільнити рухомий об'єкт, сила інерції протидіє уповільненню.

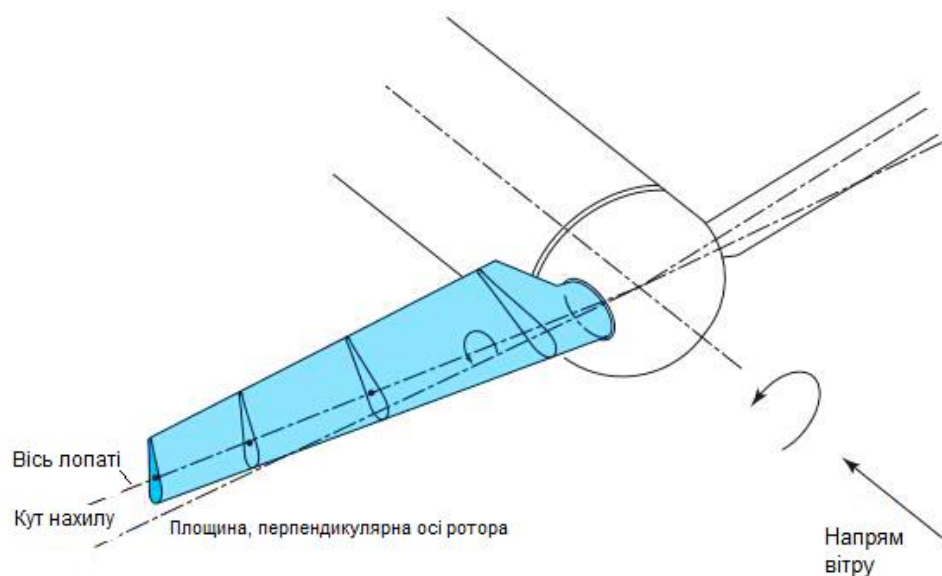


Рисунок 2.1 – Конфігурація лопаті відносно хабу ротора

На рис. 2.1 зображено лопать і хаб. Вісь лопаті, навколо якої вона обертається, зазвичай не перпендикулярна до осі ротора; між віссю лопаті та перпендикуляром є невеликий кут. Цей кут називається кутом нахилу (атаки). Цей кут змінюється, коли лопать згинається під дією аеродинамічних сил. Деякі ротори спроектовані таким чином, що кут нахилу спочатку не дорівнює нулю і

нахиляється до передньої частини турбіни; таким чином, коли аеродинамічні сили згинають лопать назад, цей кут стає меншим [14].

2.2 Аеродинамічні навантаження на лопать

На кожну лопать турбіни діють аеродинамічні сили вітру. Повітряний потік має відносно фіксований напрямок для зони, яку охоплюють лопаті, в кожну мить, але оскільки лопаті закручені, відносний напрямок вітру по відношенню до лопаті не однаковий для різних сегментів лопаті. Більше того, в той час як потік вітру має постійну швидкість (протягом короткого періоду, що розглядається), швидкість повітря в результаті обертання лопаті менша для сегментів лопаті, розташованих ближче до втулки, ніж для сегментів, розташованих ближче до кінчика лопаті. Отже, відносний рух повітря по відношенню до лопаті в результаті вітру і руху лопаті змінюється по довжині лопаті. Результуюча аеродинамічна сила, таким чином, змінюється як за величиною, так і за напрямком уздовж прольоту лопаті. Типова сила для сегмента показана на рис. 2.2.

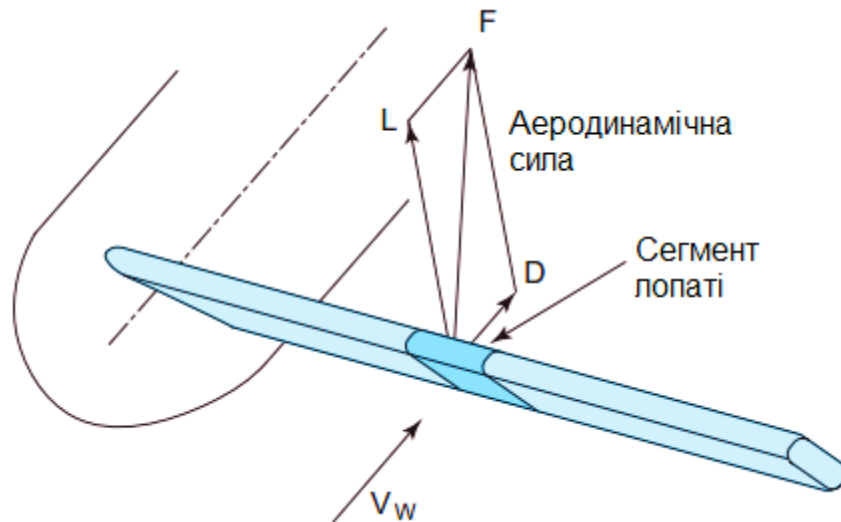


Рисунок 2.2 – Аеродинамічна сила на сегменті лопаті [14]

Сила на кожному сегменті лопаті складається з двох компонентів: один компонент вздовж напрямку вітру (сила опору, майже в горизонтальному

напрямку) і один перпендикулярно вітру (підйомна сила, майже у вертикальній площині). Ці сили зображені для дволопатевої турбіни на рис. 2.3.

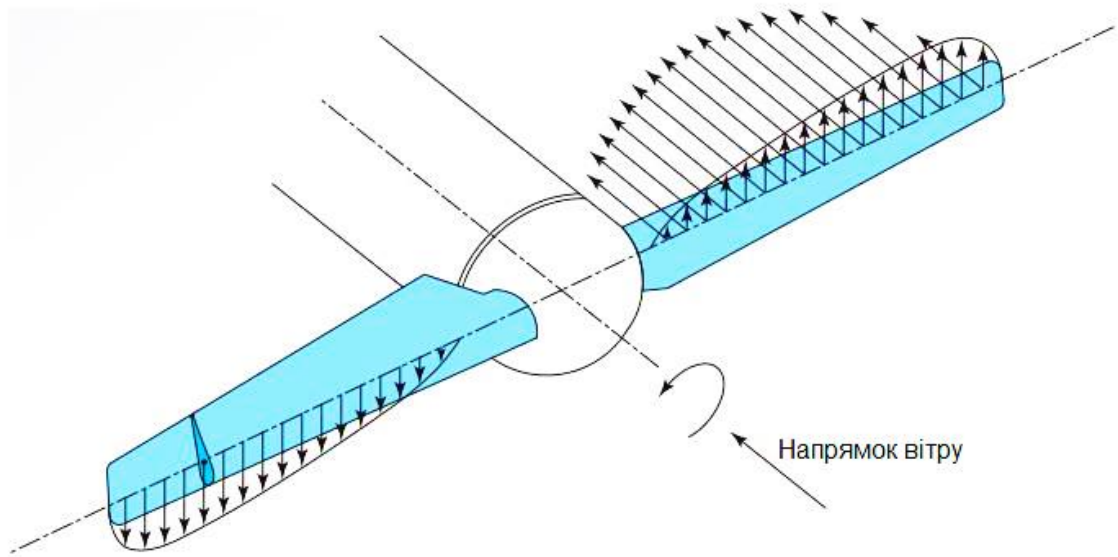


Рисунок 2.3 – Вся аеродинамічна сила на двох симетричних лопатях

Дволопатева турбіна більш доречна для демонстрації того факту, що всі компоненти вздовж напрямку вітру мають однаковий напрямок сили в обох лопатях, тоді як сили, нормальні до вітру, мають протилежні напрямки в обох лопатях, оскільки лопаті симетричні одна відносно одної. Показані сили відповідають ситуації, коли лопать оперена і не вловлює багато енергії. Це зроблено лише для наочності малюнка. З цього також випливає той факт, що горизонтальна сила на лопаті більша, коли турбіна стоїть на стоянці, ніж коли вона працює.

Легко перевірити, що результатом дії двох наборів сил є поштовх на обидві лопаті у напрямку вітру і крутний момент навколо осі валу турбіни. Іншими словами, всі ці компоненти сили вздовж напрямку вітру сприяють зворотному поштовху на лопаті та не створюють ніякого обертового руху. Однак ті компоненти сили, які діють у протилежному напрямку в (майже) вертикальній площині, є єдиними, що створюють крутний момент, який змушує турбіну обертатися.

Щойно згадані аеродинамічні сили є функціями швидкості вітру, швидкості обертання і кута тангажу. Тому вони не є однаковими для різних

умов експлуатації та коли турбіна стоїть на стоянці. Лопать повинна бути здатна витримувати ці сили в найважчих умовах, тобто коли ці сили є найвищими. Всі сили, що діють на турбіну, в кінцевому підсумку повинні передаватися на землю через вежу [14].

На додаток до попередніх сил, на лопать діє власна вага, а при обертанні з постійною швидкістю – поздовжня сила, тобто сила, що діє вздовж довжини лопаті. Остання є відцентровою силою. Величина сили ваги лопаті завжди постійна; її напрямок також завжди однаковий, у вертикальному напрямку і вниз.

Під час запуску та зупинки відбувається зміна швидкості, і в дію вступає додаткова сила: сила інерції. Сила інерції спрямована в бік, протилежний напрямку лопатей. Її величина залежить від того, як швидко турбіна відновлює нормальну швидкість обертання після запуску або як швидко вона зупиняється під час зупинки. Напрямок сили інерції протилежний напрямку обертання під час запуску і збігається з напрямком обертання під час зупинки.

Відцентрова сила завжди діє в радіальному напрямку і спрямована назовні від центру обертання. У цьому сенсі, коли лопать висить вниз, відцентрова сила і сила ваги складаються, а коли лопать знаходиться у вертикальному положенні (вістря вгору), відцентрова сила і сила ваги спрямовані в різні боки і віднімаються одна від одної. Сила інерції, коли вона існує (тобто під час прискорення і уповільнення руху ротора), завжди спрямована збоку від лопаті. Напрямок сили ваги змінюється по відношенню до напрямку лопаті, оскільки вона завжди вертикальна. Ці сили показані на рис. 2.4.

Таким чином, лопать піддається комбінованому навантаженню: напруженню при розтягуванні внаслідок дії поздовжніх сил, а також напруженню розтягування і стиснення внаслідок дії бічних сил, які прагнуть зігнути лопать. Зверніть увагу, що компонент аеродинамічного опору діє під кутом 90° до бічних і відцентрових сил. Таким чином, лопать згинається в двох напрямках.

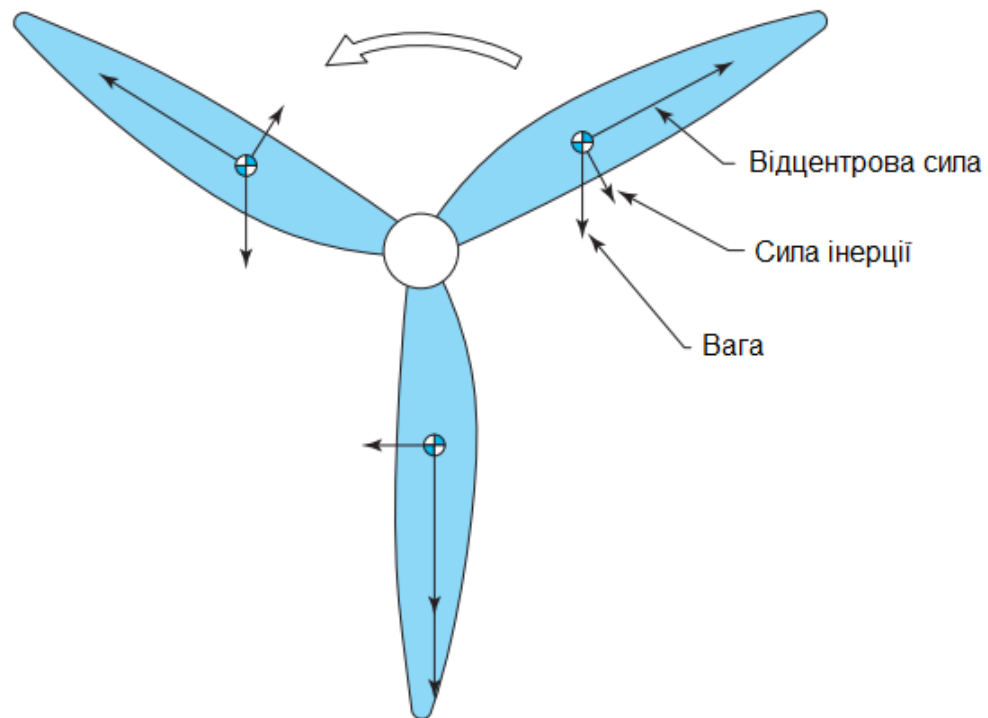


Рисунок 2.4 – Відцентрова, інерційна та сила ваги при трьох положеннях лопаті [14]

2.3 Механічні вібрації лопатей

Розглянемо ротор вітрової турбіни. Коли лопать знаходиться у верхньому положенні, на неї діють сильніші аеродинамічні сили, ніж у нижньому, оскільки швидкість вітру вища на більшій висоті. Наприклад, у турбіни з лопатями довжиною 50 м різниця між найвищою і найнижчою точками, через які проходять лопаті, становить 100 м. Швидкість вітру між цими двома точками неоднакова, а отже, на кожен лопать діють більші аеродинамічні сили, коли вона під час обертання проходить верхню частину свого курсу. Крім того, в нижній частині обертання лопать перетинає тінь від вежі. Вежа діаметром 3 м має достатній вплив на вітровий потік, щоб значно зменшити швидкість вітру перед нею по всій її довжині. Механічний компонент, на який діє змінна сила, повинен бути спроектований міцнішим, ніж якби на нього діяла постійна сила.

При постійній швидкості обертання попередні явища призводять до циклічної зміни сил, що діють на лопаті та ротор. Ця циклічна зміна величин сил призводить до вібрації лопатей, а також вібрації ротора. Коли ці вібрації

мають невелику амплітуду, це не завдає шкоди, але якщо частота вібрацій дорівнює або близька до власної частоти лопатей, це може призвести до небажаних наслідків.

Щоб запобігти накопиченню вібрації в роторі, лопаті повинні бути спроектовані таким чином, щоб їх власна частота була достатньо віддаленою (зазвичай вище) від частоти обертання ротора.

Зміна аеродинамічних та інших сил в лопатях, таким чином, може викликати сильні вібрації як в кожній лопаті, так і в роторі. Зауважте, що загалом вібрація довгої деталі, такої як лопать, може відбуватися навколо трьох осей, як показано на рисунку 2.4. Вібрації навколо осей x і y пов'язані з вигином лопаті; вони впливають на тіло лопаті і болти, що кріплять її до хабу, а також на її підшипник в турбіні з регулюванням кроку. Інша можлива вібрація лопатей – це вібрація навколо осі лопаті (вісь z на рис. 2.5); вона пов'язана з крученням лопаті під дією моментів, що діють навколо цієї осі (див. рис. 2.4). Цей тип вібрації називається флаттером.

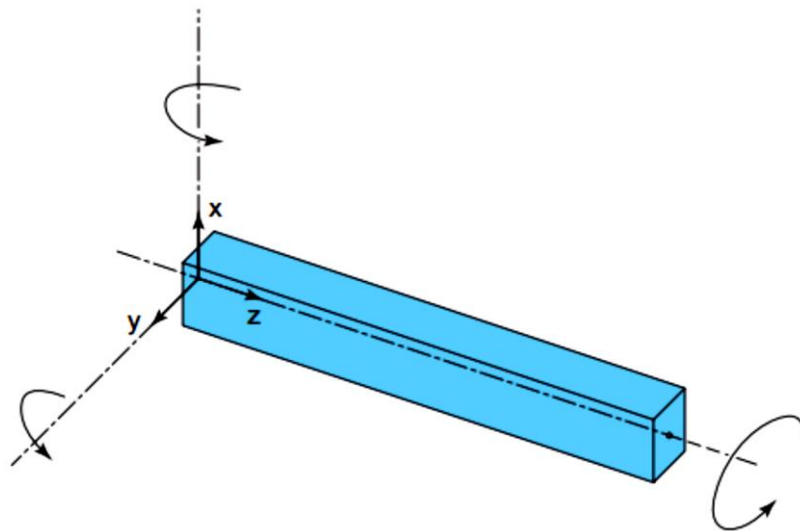


Рисунок 2.5 – Можливі вібрації в лопатці турбіни

Вібрації всього ротора впливають на підшипники на головному валу і передаються на редуктор. Вплив вібрацій ніколи не є бажаним, і якщо вібрація виявлена, її джерело необхідно знайти і усунути якомога швидше.

Іншим джерелом вібрації ротора є дисбаланс лопатей. Три лопаті повинні бути абсолютно однорідними, схожими за конструкцією, мати однакову вагу, а їх центри мас повинні знаходитися на однаковій відстані від осі ротора.

2.4 Стійність редуктора до змінних навантажень

Уся енергія, зібрана з вітру ротором, передається на генератор через редуктор. А вся потужність, що передається шестернею, концентрується на кожному зубі цієї шестерні. Це пояснює, наскільки велике навантаження припадає на зуби шестерень.

Під час обертання на ротор діє періодична сила через нерівномірність аеродинамічних сил у верхньому положенні лопаті та при проходженні через тінь вежі в нижньому положенні. Всі ці зміни призводять до пульсуючого крутного моменту на валу ротора, який передається на редуктор. Ця пульсуюча вібрація викликає втому зубів шестерні.

На додаток до попереднього, ще одне явище має небажаний вплив на редуктор турбіни. Це пов'язано з природою вітру, який дме нерівномірно. Пориви вітру можуть генерувати різкі коливання потужності на роторі, що призводить до ударів по редуктору. У промисловому обладнанні маховик зазвичай згладжує коливання навантаження і зменшує вплив нерівномірних навантажень. У вітрогенераторі роль маховика виконує сам ротор. Однак водночас він є джерелом нерівномірного навантаження. Іншими словами, згладжуючий вплив ротора на вал менший, ніж збурення, яке він вносить у вал. Враховуючи всі ці коливання, що передаються на редуктор, ми бачимо, що редуктор вітрової турбіни піддається дуже несприятливим умовам навантаження.

На сьогоднішній день одним з основних недоліків вітрових турбін є невизначеність щодо редуктора та його поведінки. Деякі редуктори вітрових турбін відмовили і вийшли з ладу після 6-7 років експлуатації. Заміна або ремонт редуктора вітрової турбіни – це великі витрати, і це змінює термін окупності вітрової турбіни. Шість або сім років – це набагато менше, ніж очікуваний термін служби в 20 років. Належне технічне обслуговування редуктора є одним з ключових питань для продовження терміну його служби.

2.5 Навантаження, які діють на конструкцію вежі

Вежа схожа на вертикальний стрункий стрижень, закріплений на одному кінці (консольна балка) і підданий:

- Навантаженню на стиск, зумовлене вагою ротора і гондоли, на її вільному кінці.
- Бічній силі, зумовленій аеродинамічними силами вітру на роторі, на вільному кінці.
- Моменту на його вільному кінці, як показано на рис. 2.6.
- Аеродинамічним силам на гондолі.
- Аеродинамічній силі на вежу.
- Вазі будь-якого іншого предмета, прикріпленого до вежі.
- Своїй власній вазі.

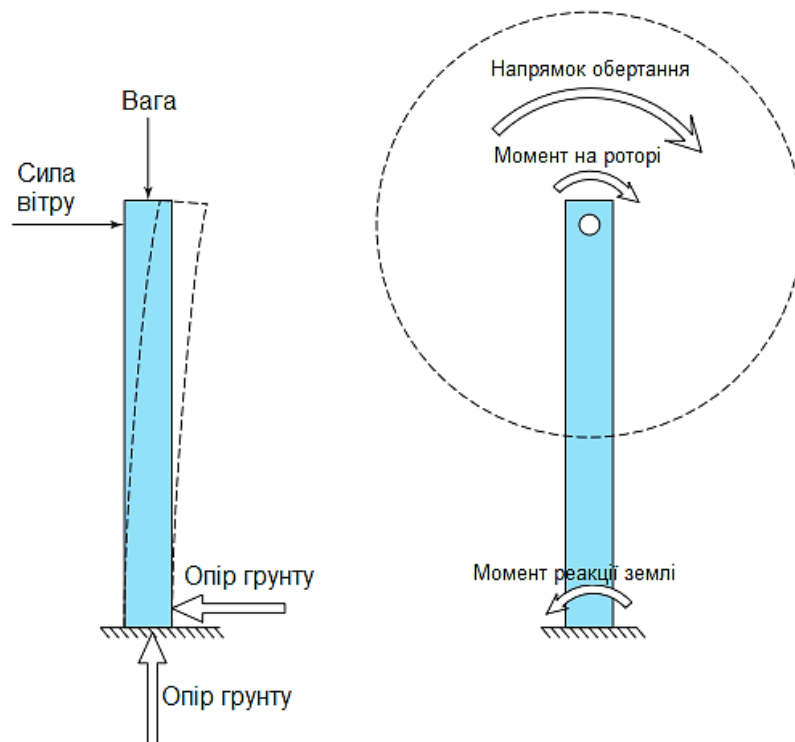


Рисунок 2.6 – Сили та момент на вершині вежі [14]

Сила вітру і крутний момент мають змінні значення і періодичний характер, а також імпульсний характер при поривах вітру, що налітає на турбіну. Залежно від географічного розташування турбіни та її конструкції,

вежа складається з трьох-чотирьох сегментів. Як правило, висота вежі дорівнює діаметру лопатей. Але це не завжди так.

Аеродинамічна сила на вежу є лише силою опору, що штовхає вежу в напрямку вітру. Припускаючи лінійну градацію від нуля (на рівні землі) до максимуму на вершині вежі, її можна замінити горизонтальною силою на $2/3$ висоти вежі від землі. Величина сили вітру на вежу задається через:

$$F = \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A,$$

де ρ – густина повітря, залежна від швидкості вітру;

c – це коефіцієнт лобового опору, фактор, який залежить від форми об'єкта.

A – площа поверхні, що блокує вітровий потік.

Таким чином, A – це проекція форми об'єкта в напрямку, перпендикулярному до вітрового потоку. Наприклад, для прямокутної призми c більший, ніж для круглої труби.

2.6 Аналіз несправностей

Вітрова турбіна повинна працювати безпечно для операторів, які виконують технічне обслуговування, для оточуючих людей і для самої турбіни. Всі ризики і небезпеки повинні бути зведені до мінімуму, щоб вона працювала впорядковано і ефективно. Мінімізувавши ці ризики, можна досягти тривалого і сталого терміну служби вітрової турбіни.

У попередніх розділах згадувалися навантаження і небезпеки, яким піддаються вітрові турбіни. Далі нами проаналізовано вплив умов навколишнього середовища на вітрогенератори та типові несправності. Лопаті, генератор, система регулювання ризику і редуктор виходять на перший план як найпоширеніші компоненти вітрових турбін, що виходять з ладу. Ці несправності спричиняють додаткові витрати на технічне обслуговування і

потребують превентивних підходів у фізичному проектуванні. Ці несправності виникають в результаті згаданих навантажень.

2.6.1 Несправності лопатей

Надійність є надзвичайно важливою для лопатей вітрогенераторів. Лопаті відповідають за використання механічної енергії вітру і піддаються згаданим навантаженням під час роботи. Крім того, вони можуть піддаватися стиранню або більш високим навантаженням через умови навколишнього середовища, такі як вітер, дощ, сніг, шторм тощо. Саме ці проблеми необхідно вирішувати на етапі проектування лопатей і знаходити тонкий баланс між довговічністю, аеродинамічними властивостями та рівнем шуму.

Можна сказати, що відправною точкою відмови лопатей є етап транспортування. Під час транспортування лопаті вітрогенератора, яка вийшла з виробництва, до місця експлуатації, в певних частинах лопаті можуть виникнути незначні або значні пошкодження. Ці пошкодження можуть збільшуватися при складанні і можуть швидко вийти з ладу під впливом навантажень, яким вони піддаються під час експлуатації. Інша причина – розмір леза. Збільшення розміру лопаті для використання більшої кількості механічної енергії вітру також призводить до дисбалансу ротора, корозії та більших навантажень на лопать.

2.6.2 Збої в роботі генератора

Генератори – це частини, які використовуються для перетворення отриманої енергії в електричну. Існує багато типів генераторів. Найпоширеніший тип генератора – асинхронний генератор з подвійним живленням. Існують вітрові турбіни, які стали непридатними для використання через поломку генератора.

Несправності в генераторах можна розділити на механічні та електричні. Механічні несправності здебільшого спричинені неспіввісністю або несправністю підшипників. Електричні несправності спричинені несправностями обмоток статора і ротора, а також несправностями контактних кілець.

2.6.3 Збої в роботі системи рискання

Система рискання – це система, яка використовується для позиціонування лопатей під потрібним кутом. У системах рискання виникають тріщини валів, поломки шестерень, підшипників і пошкодження цих деталей. Ці пошкодження виникають у разі поганих погодних умов і впливу великих навантажень. Несправність в системі регулювання може призвести до більш серйозних відмов, наприклад, пошкодження неправильно встановлених лопатей або надмірного навантаження на лопаті.

2.6.4 Несправності редуктора (коробки передач)

Редуктор – це система, що складається з зубчастих коліс, які доводять швидкість обертання низькошвидкісного валу до рівня, необхідного для вироблення електроенергії. У вітрогенераторах можуть використовуватися фіксовані і змінні передавальні числа між ротором турбіни і електрогенератором. Використання змінних передавальних чисел може призвести до більш стабільної і нестабільної електроенергії і забезпечити більш високу аеродинамічну ефективність. У редукторах, які тривалий час працюють у важких умовах, виникають неспіввісність валів, пошкодження підшипників, пошкодження шестерень, пошкодження валів тощо.

2.6.5 Вплив температури та змін навколишнього середовища

Вітрові турбіни встановлюються в різних географічних зонах, від спекотного і сухого клімату до вологого і холодного клімату. Крім того, встановлена вітрова турбіна піддається впливу різних кліматичних умов і сезонних змін протягом року. Ці сезонні та кліматичні зміни впливають на вітрогенератори. Наприклад, при виборі мастила і мастила, що використовується в редукторі, важливо вибрати його відповідно до регіону, де буде встановлена вітрогенераторна установка. Зі зміною сезонів вітрогенератор піддається впливу різних умов. Виробник повинен враховувати кліматичні умови регіону, де буде встановлена вітрогенераторна установка.

Різні компоненти використовуються для охолодження моторної частини вітрової турбіни влітку і для її обігріву взимку. Це можуть бути вентилятори, повітродувки та нагрівачі. Влітку вентилятори, які циркулюють зовнішнє повітря всередині, використовуються для охолодження редуктора і генератора, розташованих в гондолі. Взимку, якщо температура всередині мотогондолі недостатня, обігрівачі подають тепле повітря, щоб підтримувати всередині потрібну температуру. Тим не менш, якщо вітрогенератор вимкнений на тривалий час, мастило в редукторі може знизитися до температури навколишнього середовища і спричинити його пошкодження.

У деяких регіонах різниця температур між літом і зимою може бути незначною. У цих регіонах мастила для редуктора, вибрані для вітрогенератора, можна використовувати в обидва сезони, але важливо, щоб виробник вибирав їх з урахуванням цих температур протягом року.

Зміна температури важлива не тільки для змащування. Водночас погані погодні умови можуть впливати на роботи з технічного обслуговування, що призводить до збільшення часу обслуговування та простоїв. Ще один вплив – на анемометри. Анемометр вимірює швидкість вітру і забезпечує управління турбіною. Екстремально холодна погода, крижаний дощ можуть зупинити роботу анемометра, і швидкість вітру може дорівнювати нулю, в такому

випадку віддані команди управління будуть помилковими, що призведе до втрати часу, грошей і збитків.

Для офшорних і прибережних установок необхідно враховувати вплив морської солі на різні компоненти, тоді як наземні вітроелектростанції мають імунітет до цього впливу. З іншого боку, в запилених регіонах турбіна з часом забруднюється. Очищення лопатей і вежі, хоча і є відносно дорогим, може продовжити термін служби, а також підвищити ефективність роботи турбіни. Насправді, внутрішня частина гондоли, ступиці і башти турбіни завжди повинна бути чистою від розливів масла, мастила та інших матеріалів, що використовуються турбіною або для проведення робіт з технічного обслуговування. Оператор несе відповідальність за те, щоб після проведення робіт з технічного обслуговування все повернулося до нормального стану, і не залишилося жодних інструментів або зайвих речей.

2.6.6 Блискавка

Блискавка – це розряд статичної електрики в мільйони вольт між хмарами і землею за дуже короткий час з інтенсивним світлом, громом і великою руйнівною силою. Зі збільшенням розміру вітрогенераторів і довжини лопатей лопаті стають більш відкритими для блискавки і притягують її, подібно до громовідводу. Вплив цієї руйнівної сили на будь-яку металеву або неметалеву частину вітрової турбіни може призвести до незворотного пошкодження вітрової турбіни. Особливо пошкодження лопатей може призвести до того, що вітрова турбіна не зможе працювати. На рис. 2.7 показано, як блискавка пошкоджує лопаті вітрогенератора.

"Сьогодні всі лопаті вітрогенераторів мають блискавковідвід, вбудований всередину вздовж лопаті. Це мідний дріт або смуга, яка через з'єднання у втулці та гондолі з'єднується з корпусом вежі. Блискавковідвід виводиться назовні десь біля кінчика лопаті, щоб у разі удару блискавки він зловив розряд. Вежа металева і передає будь-який електричний заряд на землю. Блискавковідвід

всередині леза – це запобіжний пристрій. У разі удару блискавки лезо без громовідводу з більшою ймовірністю буде пошкоджено. І навпаки, якщо блискавка влучає в клинок з громовідводом, немає 100% впевненості, що вона потрапить в металевий стрижень в точці виходу назовні; таким чином, хоча шанси менші, блискавка все одно може пошкодити клинок, але в набагато меншій мірі" [14].



Рисунок 2.7 – Пошкодження лопаті турбіни від ураження блискавкою

2.6.7 Утворення льоду на лопатях

Утворення льоду можна спостерігати на лопатях вітрогенераторів, які замерзають і працюють при температурі, близькій до точки замерзання. Температура повітря, яке не знаходиться в точці замерзання, але проходить через край лопаті при температурі, близькій до неї, може досягати точки замерзання. Через дощ або вологість повітря може утворюватися різна кількість

льоду. Шар льоду, що утворюється на кромках лопатей, змінює профіль лопаті і призводить до зміни коефіцієнтів лобового опору і підйомної сили. Здатність лопаті уловлювати енергію зменшується, що призводить до отримання меншої кількості енергії. Залежно від ваги льоду на ділянці, він може навіть порушити баланс лопатей.

У той же час, під час сильного крижаного дощу і холоду може замерзнути все крило, що призведе до великих втрат. Інша проблема – падіння шматків льоду з висоти. Це може завдати шкоди навколишнім спорудам, живим істотам або населеним пунктам. У таких випадках слід приділяти додаткову увагу при виконанні робіт з технічного обслуговування.



Рисунок 2.8 – Обледеніння на лопатей вітрової турбіни

2.6.8 Конструкційні дефекти

Іншим типом поломки є конструкційна поломка. Ці поломки призводять до обвалення, перелому або зламу лопатей. Є дві основні причини: екстремальні вітри та ґрунт, на якому розташована вітрогенераторна установка.

Екстремальні вітри можуть бути дуже небезпечними для конструкційної цілісності вітрогенераторів. Особливо в регіонах, де відбуваються стихійні лиха, такі як тайфуни і урагани, пошкодження вітрогенераторів в деяких випадках неминучі, а перелом лопатей і прості поломки вважаються прийнятними.

У зв'язку з конструкцією в певних частинах вітрової турбіни може зменшитися товщина стінок корпусу і жорсткість на вигин. Композитні матеріали, що використовуються для забезпечення структурної цілісності вітрогенераторів, мають велике значення. Наприклад, композитні матеріали для лопатей, що використовуються на певній висоті, можуть бути схильні до руйнування. Приклад руйнування конструкції показаний на рис.2.9.



Рисунок 2.9 – Приклад конструкційної несправності наземних вітрових турбін

2.7 Висновки до розділу

1. Для того, щоб дослідити навантаження від ротора на решту турбіни, розглянуто різні навантаження на лопаті. В основному це аеродинамічна сила, вага і відцентрові сили, коли турбіна працює на постійній швидкості. Під час запуску і зупинки починає діяти сила інерції. згадані аеродинамічні сили є функціями швидкості вітру, швидкості обертання і кута тангажу. Тому вони не

є однаковими для різних умов експлуатації та коли турбіна стоїть на стоянці. Лопать повинна бути здатна витримувати ці сили в найважчих умовах, тобто коли ці сили є найвищими.

2. При постійній швидкості обертання явище вітрового затінення вежою призводять до циклічної зміни сил, що діють на лопаті та ротор. Ця циклічна зміна величин сил призводить до вібрації лопатей, а також вібрації ротора. Щоб запобігти накопиченню вібрації в роторі, лопаті повинні бути спроектовані таким чином, щоб їх власна частота була достатньо віддаленою (зазвичай вище) від частоти обертання ротора.

3. Під час обертання на ротор діє періодична сила через нерівномірність аеродинамічних сил у верхньому положенні лопаті та при проходженні через тінь вежі в нижньому положенні. Всі ці зміни призводять до пульсуючого крутного моменту на валу ротора, який передається на редуктор. Ця пульсуюча вібрація викликає втому зубів шестерні.

4. Проведено аналіз можливих несправностей лопатей, генератора, системи рискання та редуктора і розглянуто вплив температури, льоду на лопатях, конструкційних дефектів, блискавки та інших змін навколишнього середовища на роботу вітрогенератора.

З РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Дослідження причин та наслідків пошкоджень вітрогенераторів

У попередніх розділах наведено детальну інформацію про вітрогенератори, а також визначено несправності, пошкодження і ризики, які можуть виникнути, і пояснено параметри та умови, що впливають на ці поняття. У цьому розділі наведено результат теоретичного дослідження пошкоджень вітрових турбін, наведено типові несправності, які виникають у вітрових турбінах, і вказані їх причини. Дані про конкретні випадки були зібрані із зазначенням попередніх відмов, небезпек і ризиків, а також їх причин. В цілому досліджено великий об'єм новин та подій з інтернет джерел, на основі чого виконано статистичний аналіз причини пошкоджень.

Слід також зазначити, що при пошуку інформації зустрічалися новини про пожежі, але причину пожежі не вказано, оскільки вона не була визначена джерелами даних або органами влади. Однак ці випадки охоплюють деякі дані про пожежі, а не всі дані про пожежі, як зазначено. Наприклад, у джерелі були знайдені такі твердження, як "загорівся двигун вітрової турбіни, гондола загорілася, хоча не було шторму, кришка двигуна почала горіти, хоча не було ні блискавки, ні шторму, і причина невідома". У цих випадках, якщо не було ні блискавки, ні шторму, в цьому дослідженні тип відмови вказано як відмова генератора.

США Вашингтон Клікітат. Пожежа на вітрогенераторі

19 липня 2019 року на вітроелектростанції із загальною кількістю 128 вітротурбін у південному регіоні штату Вашингтон, США, одна з вітротурбін загорілася через механічний зсув у генераторі, рис. 3.1. Оскільки земля, на якій розташована ферма, була безплідною і сухою, полум'я з вітрогенератора перекинулося на траву і спричинило величезну пожежу. Ця пожежа була взята під контроль наприкінці 4-го дня.



Рисунок 3.1 – Пожежа на вітровій турбіні у США, Вашингтон [16]

США Каліфорнія Техачапі. Лопаті вітрогенератора на холостому ході

2 травня 2009 року швидкість обертання лопатей вийшла з-під контролю через несправність у редукторі вітрової турбіни на вітроелектростанції, розташованій у Техачапі, штат Каліфорнія, США. Під дією вітру, що посилювався, лопаті вітрової турбіни почали обертатися зі швидкістю, яку не можна було побачити оком, створюючи небезпеку для навколишнього середовища та інших вітрогенераторів, що знаходилися поруч. Через ці лопаті з дуже високою швидкістю обертання на певний час було перекрито шосе в регіоні, де вона розташована. Оскільки не було можливості легко і швидко полагодити вітрову турбіну або негайно вимкнути її, ремонт довелося чекати, поки не припиниться висока швидкість вітру.

Данія Морський вітропарк Roedsand-2. Утворення льоду на лопатях

23 грудня 2010 року морська вітроелектростанція Roedsand-2 потужністю 207 мегават працювала з потужністю 130 мегават через холодну погоду. Морська вітроелектростанція Roedsand-2 розташована в 9 км від узбережжя Rodbyhavn між німецьким островом Фемарн і данським островом Лолланн. Через холодну погоду на лопатях спостерігалось утворення льоду, і система була зупинена.

Нідерланди Medemblik Lely. Падають лопаті у вітропарку

26 грудня 2014 року влада зупинила роботу прибережної вітроелектростанції Lely з чотирма турбінами в Нідерландах після того, як з однієї з машин Nedwind N40/500 впали хаб і лопаті ротора, див. рис. 3.2. Хаб і ротори дволопатевої турбіни лежали на глибині близько метра під поверхнею води, а територія була позначена буями, щоб не створювати небезпеки для судноплавства.

Англії, Великобританія. Пожежа на вітряній турбіні

13 лютого 2014 року вітрові турбіни в Англії спалахнули під час штормового вітру, що обрушився на Північний Уельс. Англії – острів біля північно-західного узбережжя Уельсу. Вітрогенератор вітряної турбіни вийшов з ладу через збільшення швидкості вітру, а швидкість вітру перевищила 108 миль/год, що призвело до загоряння турбіни.

Німеччина Вітроелектростанція Nordsee-Ost. Падіння лопаті

25 червня 2015 року, трохи більше ніж через місяць після відкриття, німецька вітроелектростанція Nordsee Ost потужністю 295 МВт зіткнулася з проблемою. Влада була змушена закрити вітропарк після того, як одна з вітротурбін Senvion 6.2M126 зазнала пошкодження лопаті. У рятувальній операції було задіяно кілька кораблів і гелікоптер, після чого знайдені деталі доставили на виробничий майданчик Senvion у Бремерхафені.



Рисунок 3.2 – Падіння лопатей вітрових турбін у Нідерландах, вітропарк Lely [17]

Норвегія Fitjar Midtfjellet. Пожежа на генераторі Vindkraft

31 жовтня 2015 року вітрова турбіна в Мідтф'єллет Віндкрафт була зупинена і оточена через пожежу. За словами очевидця, "велика пожежа" спостерігалася у верхній частині вітрогенератора. Ерік Мортенсен, керуючий директор Midtfjellet Vindkraft, підтвердив, що вітрогенератор загорівся. Він не знав нічого, окрім того, що сталася пожежа, і територія була захищена. Під час пожежі на вітровій електростанції Midtfjellet Vindkraft у Фітьярі повністю згоріла будівля генератора (рис. 3.3). Після пожежі частина вітрової турбіни впала на землю, а периметр був оточений.



Рисунок 3.3 – Норвегія Пожежа на турбіні Fitjar Midtfjellet Vindkraft

Великобританія, Шрусбері. Нестабільна вітрова турбіна

13 червня 2016 року вітрову турбіну довелося демонтувати пожежникам та інженерам через побоювання щодо її стійкості під час штормової погоди. Пожежники з Шрусбері допомогли інженерам зняти турбіну на Шрусбері Роуд в Крессаджі, поблизу Мач Венлок. Про це повідомила прес-секретар пожежно-рятувальної служби Шропширу: "Повідомлялося, що одна вітрова турбіна була нестабільною через штормову погоду, тому її опустили за допомогою натяжних тросів і людської сили".

США Нью-Гемпширські бальзами. Утворення льоду на вітрогенераторах

1 грудня 2016 року дослідники, які працювали біля вітрових турбін висотою 400 футів на вершинах над запропонованою гірськолижною зоною Бальзамс, заявили, що є підстави для занепокоєння через те, що люди підходять надто близько (рис. 3.4). Вони бачили, як падають шматки льоду, і знайшли крижані кратери і зламані бурульки на відстані 930 футів від турбіни.

Занепокоєння викликала механічна поломка, яка могла спричинити розліт шматків металу, або, за певних умов взимку, величезні лопаті, які збирали, а потім скидали лід. Обидва випадки рідкісні, але вони можуть бути смертельно небезпечними, кажуть експерти. Коли погода вказує на те, що на лопатях може утворитися лід, вітрогенератори зупиняються.



Рисунок 3.4 – Вітрові турбіни над Бальзамами

Німеччина Баварія Зультенберг-Сойберсдорф. Витік масла в редукторі вітроелектростанції

16 березня 2017 року вітрова турбіна на вітроелектростанції Зультенберг-Зойберсдорф зупинилася після витоку масла через несправність редуктора. З редуктора стався великий витік масла, і робота вітрової турбіни була зупинена.

Дослідницька станція "Моусон" в Антарктиді. Падіння ротора вітрової турбіни

8 листопада 2017 року на австралійській дослідницькій станції в Антарктиді відвалився ротор вітрової турбіни (рис. 3.5). Ніхто не постраждав. Причина аварії, яка сталася в звичайних поривчастих умовах, розслідується. Той факт, що інтенсивність вітру в цій події була невисокою, а також помірна погода до і після події робить цю подію більш цікавою.



Рисунок 3.5 – Ротор відвалився від вітрової турбіни в Антарктиді

США Айова, шосе 65. Згин лопаті вітрової турбіни

25 липня 2018 року одна з лопатей вітрової турбіни в американському штаті Айова була зігнута, як вухо кролика (рис. 3.6) через сильний вітер, що налетів з Центральної Айови. Сильний вітер може пошкодити вітрові турбіни.

США Вітроелектростанція "Блок-Айленд". Не захищений і відкритий кабель

8 серпня 2018 року кабель вітроелектростанції, встановлений компанією National Grid в рамках проекту ВЕС "Блок-Айленд", можна було побачити на відстані близько 25 футів від міського пляжу під час відливу. Кабель жовто-

чорного кольору привертав до себе увагу (рис. 3.7). Кабель з'єднує Блок-Айленд з материком. По кабелю проходить напруга 34 500 вольт. Хоча кабель повністю броньований та ізольований, він може бути небезпечним для району.



Рисунок 3.6 – Погнута лопать вітрової турбіни в Айові, США



Рисунки 3.7 – Оголений кабель вітроелектростанції Блок-Айленд, США

Іспанія Більбао Saitec. Перекидування плавучої вітрової турбіни

4 листопада 2020 року десятиметрові хвилі розбили і перекинули прототип вітрової турбіни, коли на північ Іспанії обрушився шторм, завдавши шкоди узбережжю. Вплив сильного шторму призвів до руйнування вітрової турбіни біля узбережжя Більбао.

Данія Вітроелектростанція Horns Rev 1. Пожежа турбіни

22 травня 2021 року вітрова турбіна на вітроелектростанції Horns Rev 1 потужністю 160 МВт біля берегів Данії загорілася і згоріла. Розташована в Північному морі за 20 кілометрів від західного узбережжя Ютландії, вітроелектростанція Horns Rev 1 складається з 80 турбін Vestas V80 потужністю 2 МВт, які експлуатуються з 2002 року. Враховуючи, що інцидент обмежився однією турбіною, загальне постачання електроенергії з вітроелектростанції не постраждало.

Німеччина, вітроелектростанція Обервольфах Хохенлохен. Тріщини на лопатях

30 січня 2022 року дві з чотирьох систем на вітроелектростанції Хохенлохен на хребті над Обервольфахом і Хаусахом не працювали й очікували ремонту, причиною чого були тріщини на лопатях ротора. Експлуатація була зупинена через тріщини в лопатях. Тріщини в лопатях ротора були виявлені під час планового технічного обслуговування двох турбін.

Бельгійський шельф. Вітроелектростанції зупиняють роботу вітрових турбін

18 лютого 2022 року, вперше з моменту встановлення, всі вітрогенератори в морі були вимкнені внаслідок шторму "Юніс", який офіційно став бельгійським штормом. Проте всі турбіни, навіть найстаріші, були визнані штормостійкими, тобто сильні пориви вітру не повинні були завдати їм жодної шкоди. Лопаті вітряків були заблоковані владою, що призвело до

автоматичного вимкнення турбін. Хоча несправностей не було, сильні шторми завадили роботі вітрових турбін і призвели до зупинки виробництва (рис. 3.8). Тому цей приклад включено до дослідження.



Рисунок 3.8 – Бельгійська морська вітроелектростанція

3.2 Методика аналізу та оцінки даних

Аналітика даних – це аналіз зібраних даних з метою виокремлення закономірностей, виявлення потрібної інформації та створення знань відповідно до визначеної мети. Ці терміни представлені у світлі візуалізації та узагальнення статистичної інформації. Аналіз даних проводиться відповідно до даних, зібраних у проекті, структури даних, аудиторії, яка отримує аналіз, та досвіду аналітика.

У цьому дослідженні було підготовлено статистичну інформацію з урахуванням отриманих даних, а також під час експлуатації морських і наземних вітрових турбін було визначено ситуації відмови та ризику, проаналізовано отримані дані.

Набір даних, проаналізований у цьому дослідженні, є компіляцією 458 новинних повідомлень з 2010 по 2024 рік. Джерело даних було створено з використанням результатів, отриманих з пошукової системи Google за пошуковими термінами "збої в роботі вітрових турбін", "аварії на вітрових турбінах", "падіння вітрових турбін" тощо, а також результатів багатьох статей і літературних досліджень. У багатьох з отриманих новинних статей були виключені нерелевантні, повторювані та неперевірені новини. Були включені лише ті новини, які забезпечували певний рівень деталізації, що дозволило отримати найбільш достовірні дані.

Цей аналіз ґрунтується на загальнодоступних новинах про аварії та ризику. Без повного доступу та детальної інформації про всі відмови та аварії вітрових турбін неможливо стверджувати, що дані, використані в цьому дослідженні або подібних дослідженнях, є репрезентативними для всіх вітрових турбін. Тому що неможливо переконати всіх виробників вітрових турбін поділитися всіма своїми даними про нещасні випадки, не кажучи вже про переконання одного виробника.

Всі ці дані, отримані з 2010 по 2024 рік, про відмови, ризику, збитки та небезпечні ситуації стосувалися експлуатації морських та наземних вітрових турбін. Тому фактори відмов і ризиків під час будівництва або транспортування не враховано. За короткий час знадобилося докласти багато зусиль, щоб розширити рамки та зібрати потенційні, надійні та великі обсяги даних.

Такі деталі, як місце, дата, тип аварії, причина аварії, тип вітрової турбіни та інші характеристики, були ретельно і копітко зібрані вручну шляхом детального читання кожного повідомлення, розуміння змісту та пошуку інформації в Інтернеті, щоб доповнити будь-яку відсутню інформацію.

3.3 Аналіз та результати досліджень

Цей розділ підсумовує дані, зібрані та згенеровані під час дослідження, такі як частота відмов, розподіл по країнах, фактори ризику, з табличним та графічним аналізом.

Першим аналізом у цьому дослідженні був аналіз зібраних даних, що показує розподіл частоти типів збоїв у наборах даних. На рисунку 3.9 нижче показано частоту збоїв.



Рисунок 3.9 – Графік, що показує відсоток відмов

Перший аналіз був зосереджений на розподілі частоти відмов, як показано на рис.3.9. Як видно з графіка, відмови лопатей і генератора охоплюють відмови і ризики морських і наземних вітрових турбін 29 % кожна. Конструкційні займають 24 %. Влучання блискавки становлять 8 %, відмови редукторів – 6 %, утворення льоду в турбінах – 3 %, а несправності, спричинені впливом температури та навколишнього середовища – 1 %. Відмови системи регулювання ризику не були виявлені в зібраних даних.

Для полегшення оцінки графічних результатів у таблиці 3.1 наведена частота відмов.

Таблиця 3.1 – Частота відмов

Тип несправності	Відсоток відмов
Поломка лопаті	29%
Несправність генератора	29%
Конструкційна несправність	24%
Влучання блискавки	8%
Несправність коробки передач	6%
Збій через формування льоду	3%
Температурна та екологічна несправність	1%

Відсоткові частки причин відмов лопатей, які мають високий показник загальної кількості відмов, показані на рис. 3.10 нижче.

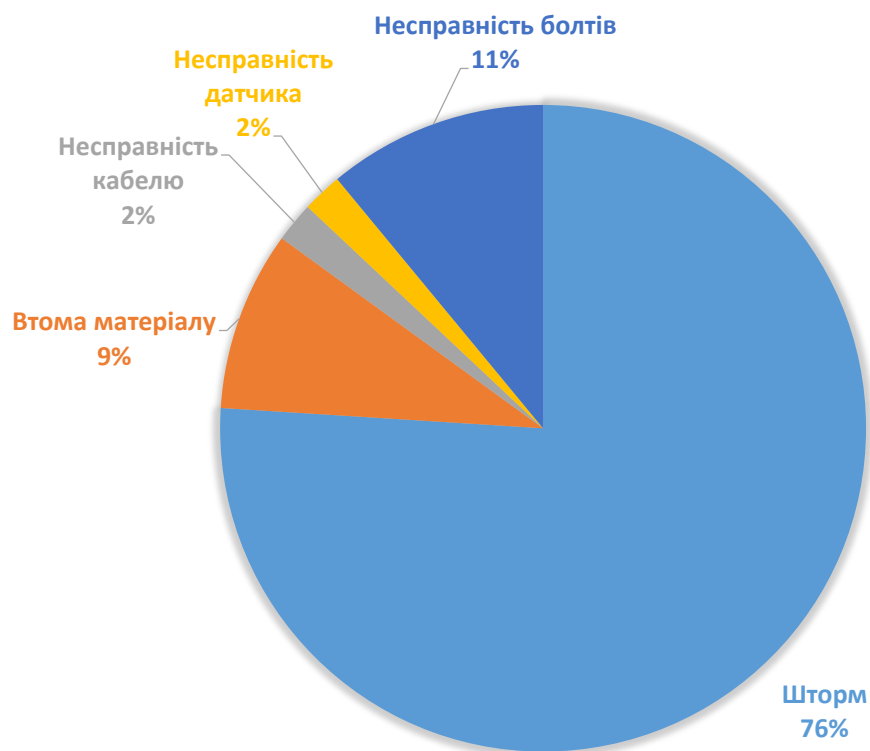


Рисунок 3.10 – Причини виходу з ладу лопатей

Розглядаючи відомі причини відмов лопатей, які становлять 29 % від загальної кількості відмов, видно, що 76 % з них пов'язані зі штормом, 11 % – з несправностями болтів і кріплень, 9 % – з втомою матеріалу і 2 % – з

несправностями кабелів і датчиків. В результаті цих відмов і ризиків траплялися такі результати, як поломка лопаті, падіння, пошкодження лопаті, згинання лопаті.

Відсоткове співвідношення причин відмов генераторів показано на рис. 3.11 нижче.

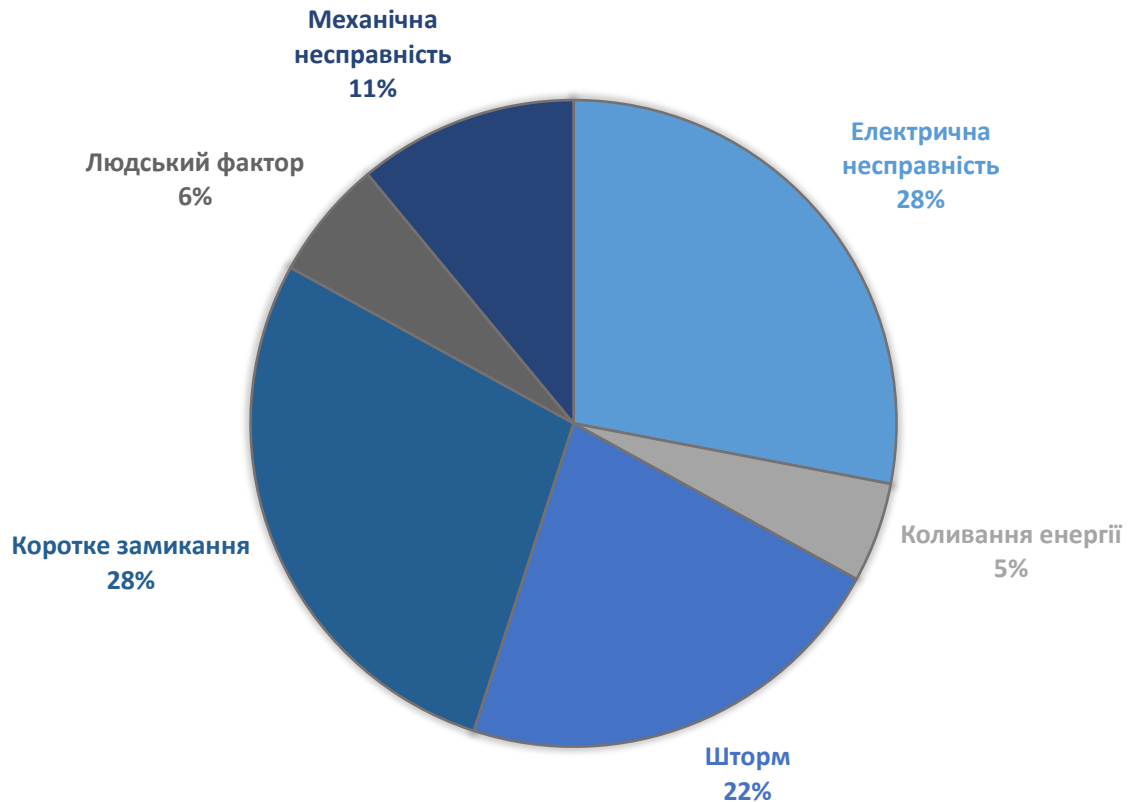


Рисунок 3.11 – Причини відмов генератора

Якщо проаналізувати отримані дані про відомі причини відмов генераторів, то відсоткове співвідношення причин відмов виглядає так, як показано на рис. 3.11. На коротке замикання та електричні несправності припадає 28 %. Електричні несправності включають несправності в електричному щиті, несправності стабілізатора напруги, несправності перетворювача. Видно, що частота відмов генератора через шторми становить 22 %, механічні несправності – 11 %, людські помилки – 6 % і коливання енергії – 5 %. Переважна більшість відмов генератора призводить до пожежі.

Відсоток причин конструкційних відмов із загальним відсотком відмов у 24 % показано на рис. 3.12.



Рисунок 3.12 – Причини аварій конструкції

Якщо проаналізувати проценти відомих причин конструкційних відмов, то вітрогенератори були пошкоджені через шторм – 63 %, механічні несправності, такі як неспіввісність і несправності стабілізації, становлять 15 %, високі витрати на технічне обслуговування, несправності, такі як відсутність механічних деталей, є відмовами обладнання – 8 %. 4 % – це зіткнення і 1 % – людський фактор. Більш детальну інформацію можна побачити в Додатку А. Переважна більшість структурних відмов призводить до падіння вітрових турбін.

На рис. 3.13 показано відсоток причин відмов редукторів, які становлять 6 % від загальної кількості відмов. Не було потреби показувати причини виходу з ладу через обледеніння, блискавку, а також температурні та кліматичні несправності, які становлять решту несправностей.

Основною проблемою, що призводить до виходу з ладу коробки передач, є витік мастила – 40 %. Гальмівна система та втома матеріалів складають 20 %, несправності підшипників – 15 %, а поломка та ризиковані ситуації внаслідок шторму – 5 %.

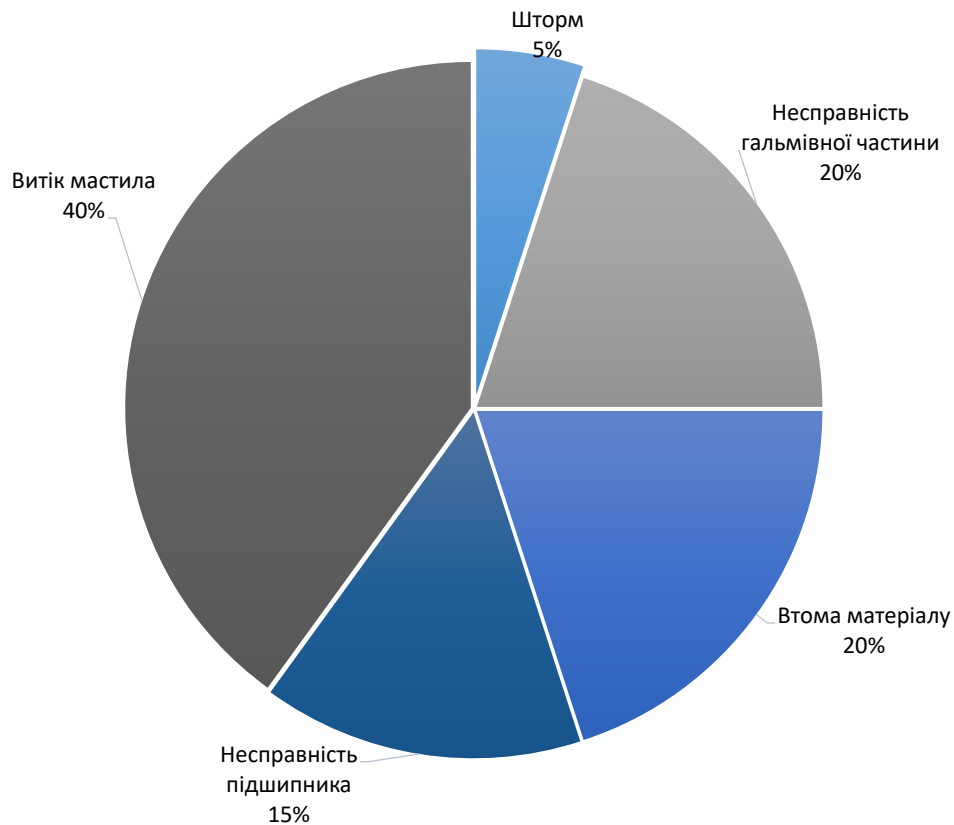


Рисунок 3.13 – Відсотки причин виходу з ладу редукторів

Інший аналіз був зосереджений на розподілі відмов за країнами, як показано на рис. 3.14. На країни США, Німеччину, Великобританію та Канаду припадає більшість збоїв у наборі даних.

Розглядаючи розподіл несправностей за країнами, на першому місці – США з 31 %, на другому – Німеччина з 24 %, на третьому – Великобританія з 16 %, на четвертому – Канада з 7 %, на п'ятому – Данія з 3 %.

Відповідно до зібраних та проаналізованих даних, співвідношення розподілу типів відмов за країнами наведено на рис.3.15.

У таблиці 3.2 детально розглянуто розподіл за країнами. Відмови лопатей, генератора та структурні відмови виглядають найбільш поширеними в результаті аналізу розподілів у країнах з великою кількістю даних, таких як США, Німеччина та Великобританія.

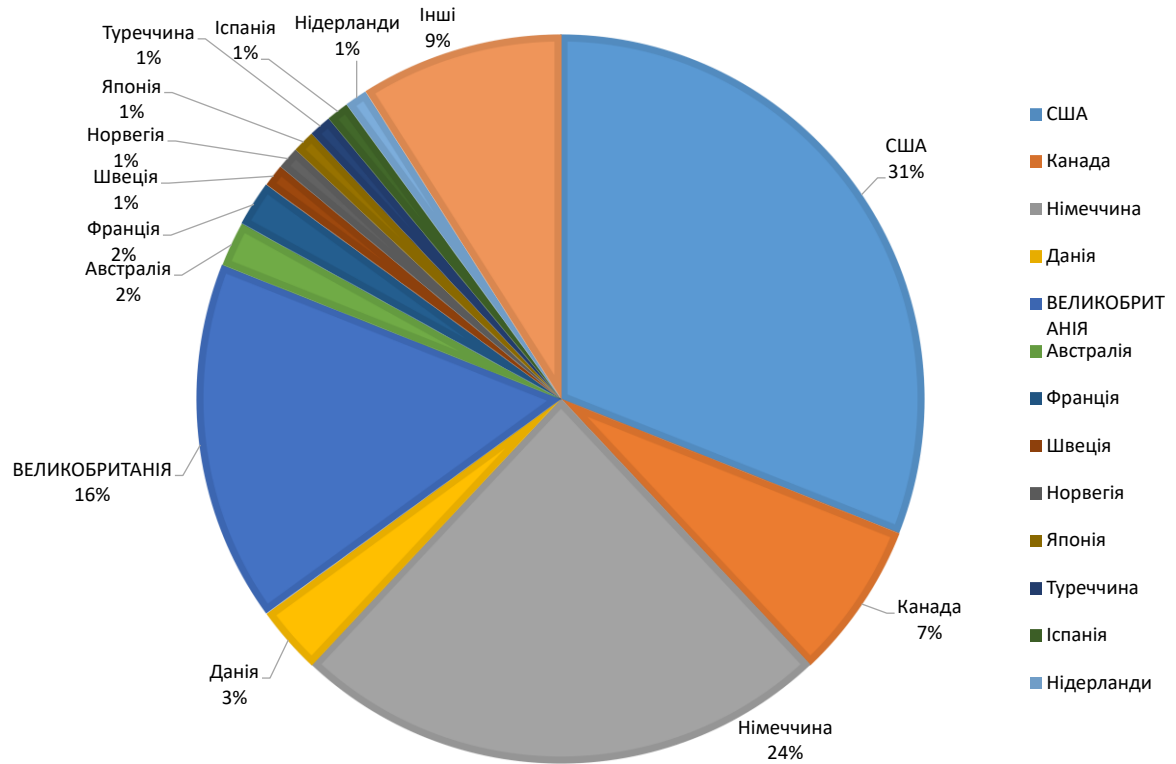


Рисунок 3.14 – Розподіл відмов за країнами

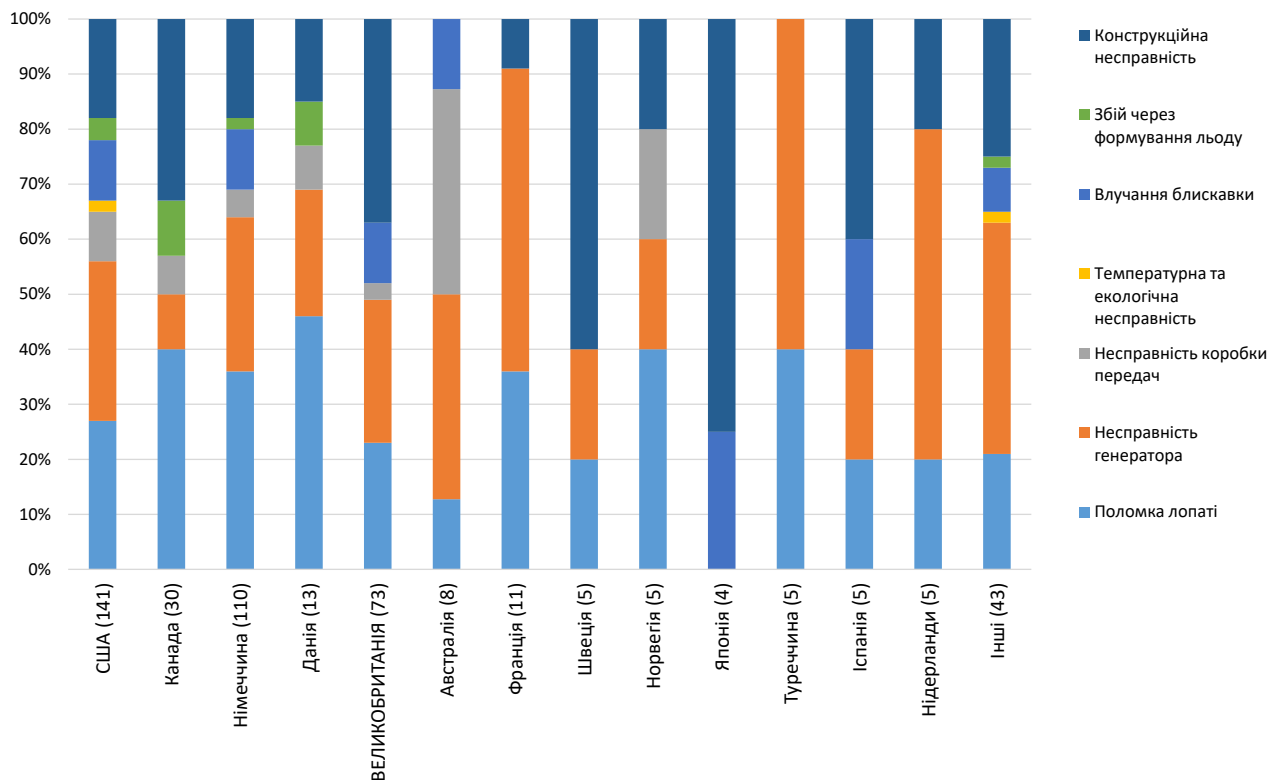


Рисунок 3.15 – Типи відмов за країнами

Таблиця 3.2 – Типи відмов за країнами

Країни (загальна кількість випадків)	Поломка лопаті	Несправність генератора	Несправність коробки передач	Температурна та екологічна несправність	Влучання блискавки	Збій через формування льоду	Конструкційна несправність
США (141)	27%	29%	9%	2%	11%	4%	18%
Канада (30)	40%	10%	7%	0%	0%	10%	33%
Німеччина (110)	36%	28%	5%	0%	11%	2%	18%
Данія (13)	46%	23%	8%	0%	0%	8%	15%
Великобританія (73)	23%	26%	3%	0%	11%	0%	37%
Австралія (8)	13%	38%	38%	0%	13%	0%	0%
Франція (11)	36%	55%	0%	0%	0%	0%	9%
Швеція (5)	20%	20%	0%	0%	0%	0%	60%
Норвегія (5)	40%	20%	20%	0%	0%	0%	20%
Японія (4)	0%	0%	0%	0%	25%	0%	75%
Туреччина (5)	40%	60%	0%	0%	0%	0%	0%
Іспанія (5)	20%	20%	0%	0%	20%	0%	40%
Нідерланди (5)	20%	60%	0%	0%	0%	0%	20%
Інші (43)	21%	42%	0%	2%	8%	2%	25%

Інший аналіз – це частота відмов вітрогенераторів за типами вітрогенераторів. У наборі даних є 29 морських вітрових турбін і 429 наземних вітрових турбін, що охоплює 458 випадків. Частота відмов морських і наземних вітрових турбін показана на рис. 3.16.

За типами відмов морських вітрових турбін (рис. 3.17) слідують, перш за все, конструкційні відмови – 14 випадків, відмови лопатей – 7 випадків і відмови генератора – 4 випадки. На інші типи відмов припадає по 1 випадку.

Відсоткове співвідношення типів відмов морських вітрових турбін показано на рис. 3.17. Найбільшу частку займають конструкційні відмови – 48,2%, за ними йдуть відмови лопатей – 24,3% і відмови генератора – 13,9%. На решту несправностей припадає по 3,4%.

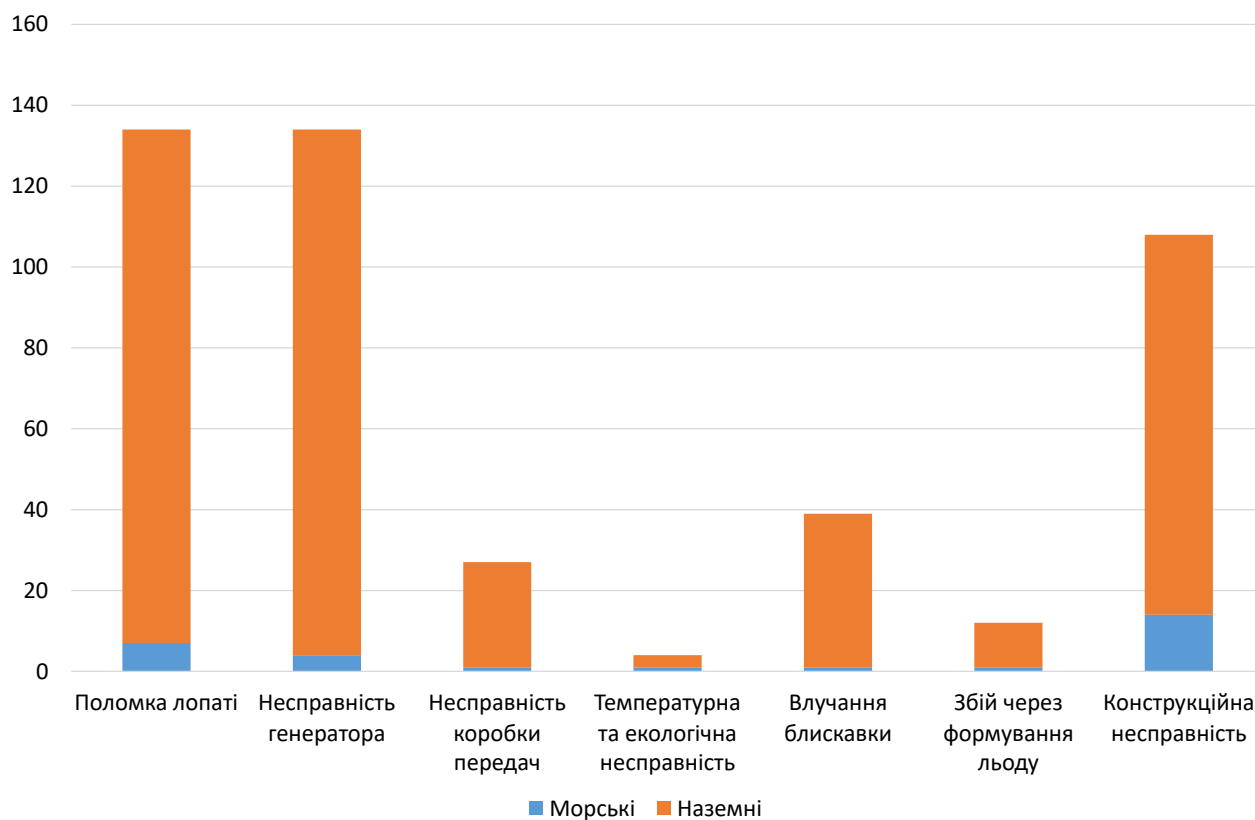


Рисунок 3.16 – Частота відмов морських та наземних вітрових турбін

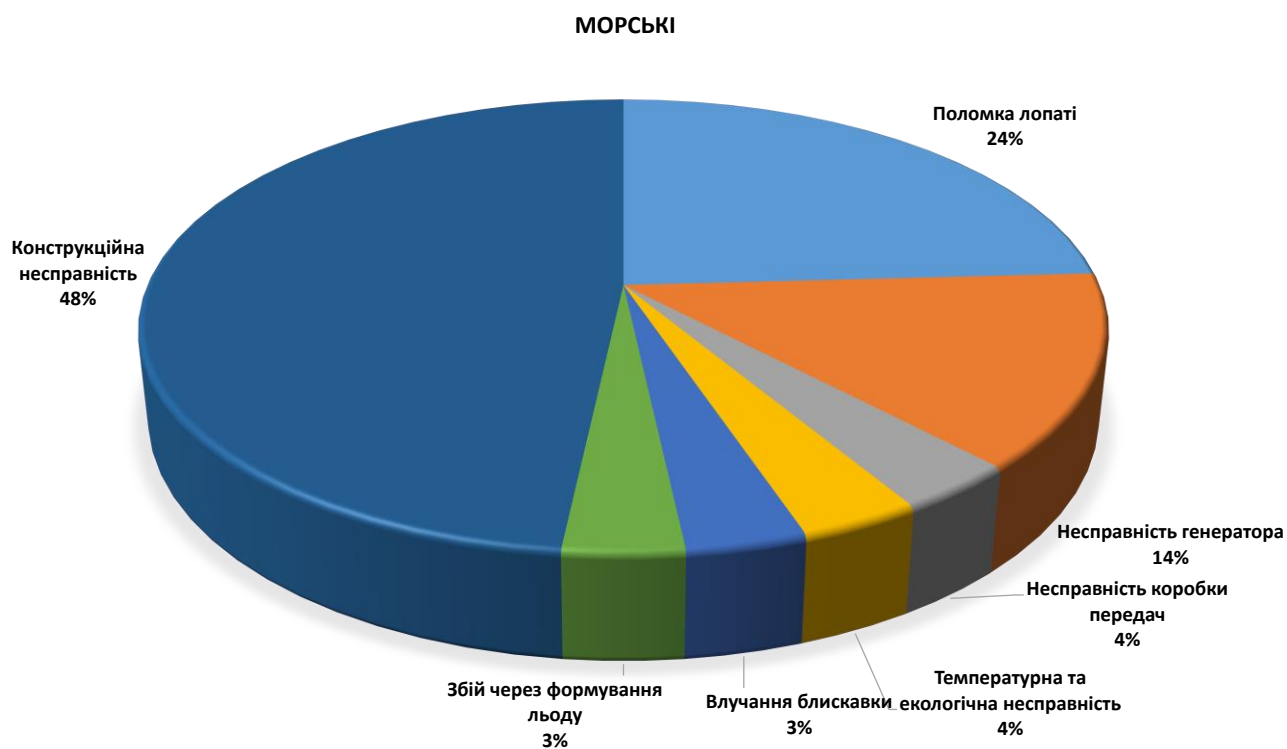


Рисунок 3.17 – Відсоток відмов морських вітрових турбін

Відсоткове співвідношення типів відмов наземних вітрових турбін показано на рис. 3.18. Відмови генератора займають перше місце – 30,3 %, за ними йдуть відмови лопатей – 29,6 %, структурні відмови – 21,9 %, удари блискавки – 9,2 %, відмови редуктора – 6 %, утворення льоду – 2,3 % і, нарешті, відмови, пов'язані з температурою і навколишнім середовищем – 0,7 %.

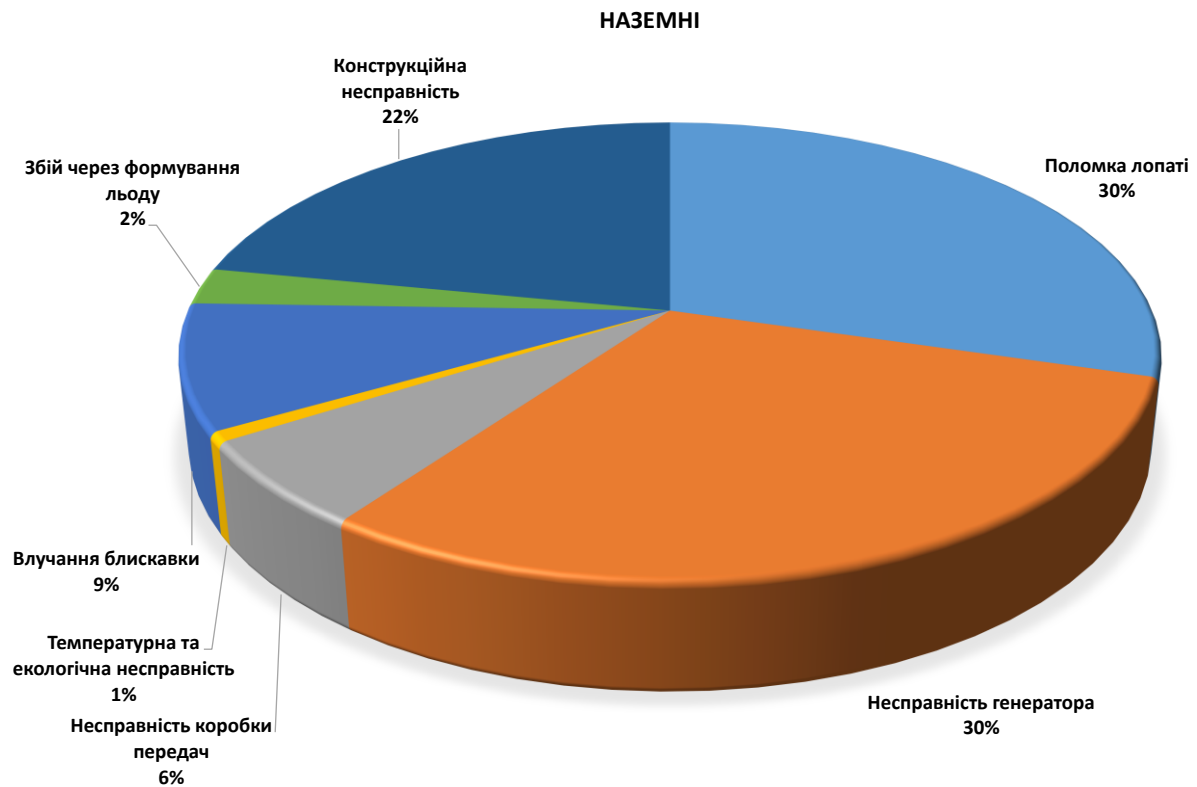


Рисунок 3.18 – Питома вага відмов наземних вітрових турбін

На основі отриманих даних інформацію про причини та наслідки відмов наведено в таблиці 3.3. Відмови представляють різні ризики та збитки. Ці зведені статистичні дані, що базуються на досвіді останнього десятиліття збоїв можуть бути використані багатьма способами, в тому числі там, де потрібно зосередитися на зменшенні кількості збоїв і розробці рекомендацій для попередження пошкоджень та відмов.

Таблиця 3.3 – Причини та наслідки типів відмов

Тип несправності	Причина відмови	Результат відмови
Поломка лопаті	– Шторм – Втома матеріалу – Несправність кабелю – Несправність датчика – Несправність болта	– Падає – Нахиляється – Тріщина – Перерва в роботі – Зупинка в роботі
Несправність генератора	– Електрична несправність – Шторм – Коливання енергії – Коротке замикання – Людська провина – Механічна несправність	– Вогонь! – Шумна робота – Зупинка в роботі – Витік масла – Вибух!
Несправність коробки передач	– Шторм – Несправність гальмівної частини – Матеріальний дефект – Несправність підшипника – Витік масла	– Холосте обертання лопатей з високою швидкістю – Зупинка в роботі – Вогонь! – Вал і редуктор пошкоджені – Поломка коробки передач
Температурна та екологічна несправність	– Холодна погода – Шторм – Раптові зміни погоди	– Зупинка в роботі – Витік масла – Розширення
Влучання блискавки		– Вогонь! – Зупинка в роботі – Тріщини на лопатях – Пошкодження турбіни
Збій через формування льоду	– Мінусова температура	– Утворення льоду на лопатях
Конструкційна несправність	– Несправність фундаменту – Шторм – Механічна несправність – Людська провина – Зіткнення – Несправність обладнання	– Колапс – Зупинка в роботі – Частини падають – Пошкодження турбіни – Вигин башти – Нестабільна робота – Вогонь!

3.4 Розробка рекомендацій для попередження пошкодження вітрових турбін

У цьому розділі наведено рекомендації та заходи, які можуть бути вжиті для обмеження відмов відповідно до результатів аналізу. У цьому дослідженні були розглянуті ситуації відмов і ризиків морських і наземних вітрових турбін під час експлуатації, а також проведений аналіз відмов на користь досліджень у галузі вітроенергетики.

Нижче представлено заходи щодо пом'якшення наслідків, які можуть бути вжиті на основі результатів аналізу, проведеного в розділі 3.3.

Отже переважна більшість відмов лопатей спричинена штормами. Крім того, спостерігалися такі результати, як падіння, згинання і розтріскування лопатей внаслідок втоми матеріалу, дефектів проводки і збірки, а також несправності датчиків. Слід, однак, зазначити, що дані про вік лопатей, що вийшли з ладу, невідомі, а аеропружні міркування останнім часом стали набагато важливішими на етапі проектування сучасних вітрових турбін, щоб уникнути відмов лопатей. *Тому необхідно перед будівництвом вітропарку проводити його аеродинамічне і конструктивне моделювання відповідно до місця розташування морських і наземних вітрових турбін, а кліматичні умови повинні бути одними з основних факторів, які слід враховувати при проектуванні вітрових турбін.* Особливо в сучасних вітрогенераторах з великими діаметрами ротора це питання має життєво важливе значення для вирішення проблеми взаємодії рідини і конструкції та мінімізації надмірних навантажень. Крім того, *вибір аеропружних матеріалів повинен здійснюватися з урахуванням умов експлуатації, а в лопатях вітрогенераторів, які мають досить велику довжину, слід впровадити моніторинг стану конструкції за допомогою датчиків зворотного зв'язку в режимі онлайн.* Щоб уникнути цих відмов і пов'язаних з ними ризиків, *слід проводити регулярні і планові роботи з технічного обслуговування, а також, за необхідності, скорочувати час між технічним обслуговуванням.*

Основними причинами виходу з ладу генератора є електричні несправності, які включають коротке замикання і колювання напруги, шторми та механічні пошкодження. Більшість відмов генератора призводять до пожежі, що виводить з ладу всю турбіну. Оскільки важко втрутитися у вітрову турбіну, яка почала горіти, очікують, що вогонь завершить горіти. Цей тип пожежі не тільки пошкоджує турбіну, але й завдає шкоди навколишньому середовищу. Тому *аналіз електричної стабільності всіх турбін або вітрогенераторів вітроелектростанції повинен проводитися з метою мінімізації та подолання збоїв у роботі генератора.* Таким чином, можна виявити колювання енергії, перепади струму та електричні несправності, яким піддаються вітрові турбіни. *Метод спектрального аналізу може бути використаний для виявлення несправностей обмоток, які часто зустрічаються при відмовах генератора.* Таким чином можна виявити і відстежити несправності. Для виявлення коротких замикань в обмотках статора може бути створена динамічна модель простору станів. Більш детальну інформацію про ці методи можна знайти в літературі. Крім того, *існують методи, які використовують вихідну потужність генератора для виявлення і запобігання механічним несправностям в генераторі, таким як осьова неспіввісність.* Аналіз вібрації та струму генератора може бути виконаний для виявлення несправностей підшипників. Цьому слід запобігати шляхом одночасного моніторингу струму і частотно-часового моніторингу.

Більшість руйнувань конструкцій спричинені буревіями. Крім того, серед причин – механічні несправності, такі як неправильна збірка і неспіввісність, а також дефекти фундаменту. В результаті цих несправностей вітрова турбіна руйнується, частини турбіни падають, вежа турбіни згинається або стає нестабільною. Щоб запобігти структурним пошкодженням, *необхідно розробити аеродинамічні та структурні моделі, так само як і для пошкоджень лопатей.* Реакція вітрової турбіни на надмірні навантаження повинна бути визначена заздалегідь. Це передбачає збір даних про вітер на майданчику, щоб переконатися, що турбіни спроектовані таким чином, щоб

витримувати фактичні швидкості вітру і турбулентність вітру на майданчику з низькою ймовірністю перевищення (зазвичай конструкція розрахована на вітрові умови з річною ймовірністю перевищення 2×10^{-20}). На етапі будівництва вітрової турбіни фундамент вежі повинен бути стійким і міцним. *Вітрову турбіну слід проектувати відповідно до кліматичних та екологічних умов, тобто відповідно до місця розташування. За допомогою датчиків моніторингу, що забезпечують зворотний зв'язок в режимі онлайн, вітрова турбіна повинна знаходитися під постійним контролем, і слід проводити планове технічне обслуговування, а частоту періодів технічного обслуговування слід збільшити, якщо це необхідно. У той же час, заходи з технічного обслуговування повинні бути спрямовані на запобігання несправностей у збірці. Несправності збірки можна виявити за допомогою аналізу вібрації.*

Основними причинами *відмов редуктора* є витік масла, несправності гальмівного механізму і втома матеріалу. З цих причин трапляються випадки, коли лопаті вітрогенератора обертаються на високій швидкості на холостому ходу, а потім різко зупиняються. Діагностика редуктора є складною. Для виявлення несправностей в колі зв'язку редуктора виконується аналіз вібрації, але через принцип роботи редуктора виявлення несправностей за допомогою аналізу вібрації не завжди може бути успішним. Тому в літературі запропоновано загальний метод аналізу амплітудно-частотної демодуляції, заснований на алгоритмі розділення енергії. Цей метод може бути використаний для виявлення зносу та пошкоджень в коробці передач. Для виявлення несправностей коробки передач, окрім планового технічного обслуговування, регулярне проведення подібних аналізів експертами може запобігти витoku мастила, нормальному функціонуванню гальмівної системи та втомі матеріалу.

Що стосується *температурних і екологічних відмов* і відмов при утворенні льоду, регіон, в якому розташовані вітрогенератори, має дуже важливе значення. Особливо, якщо сезонні відмінності в регіоні, де

розташовані вітрові турбіни, є високими, вітрова турбіна може зазнати впливу цих сезонних відмінностей. Видно, що різниця температур пошкоджує деталі турбіни і мастило. Щоб запобігти цій ситуації, *важливо вибрати матеріали і мастило, які підходять для кліматичних умов регіону, де розташована вітрова турбіна*. Вітрогенератори, що працюють у відкритому морі, піддаються впливу солоної води і солоних морських бризок, що негативно позначається на всіх деталях. Щоб запобігти цій ситуації, необхідне регулярне і часте технічне обслуговування. Крім того, *зниження температури повітря до мінусової або близької до неї викликає утворення льоду на лопатях*. Щоб запобігти цьому, слід проводити регулярне технічне обслуговування і припинити експлуатацію, особливо в певних сезонних умовах.

Пожежі та пов'язані з ними збитки виникають внаслідок ударів блискавки у вітрові турбіни. Існує дві різні пропозиції щодо пом'якшення наслідків удару блискавки. Перша полягає у захисті від блискавки, друга - у зменшенні впливу блискавки. *По-перше, для захисту від блискавки слід встановити надійну систему заземлення*. Вітрові турбіни можуть притягувати блискавку через свої розміри. Для таких випадків слід використовувати блискавковідводи, а отриману високу енергетичну напругу відводити від системи за допомогою заземлення. Таким чином, можна уникнути коливань енергії, змін струму тощо. *Слід збільшити кількість робіт з технічного обслуговування, особливо після штормової погоди*. Другий метод полягає у використанні скоординованих пристроїв захисту від перенапруги для систем електропостачання, щоб запобігти пошкодженню блискавкою. Ці системи блискавкозахисту ефективні для скоординованого захисту компонентів вітрогенераторів і зменшення наслідків раптових перепадів напруги.

Як видно з аналізу даних, кількість відмов морських вітрових турбін менша, ніж кількість відмов наземних вітрових турбін. Окрім того, що морських вітрових турбін менше і що ці турбіни представляють новішу технологію, таку ситуацію пояснюють такі фактори, як високі витрати на встановлення та обслуговування, відсутність інфраструктури, яку може

створити кожна країна, а також важкодоступність місця, де вони будуть розміщені.

Крім того, в цьому дослідженні ми хочемо ще раз привернути увагу до проблем, пов'язаних з виходом з ладу генераторів. Як видно з набору даних, несправності генераторів є поширеним явищем, і більшість з них призводять до пожеж. Крім того через відмову генератора демонтують усю турбіну та виникають пожежі, які загасити практично неможливо і необхідно чекати поки вона загасне сама по собі.

3.5 Висновки до розділу

1. Наведено результат теоретичного дослідження пошкоджень вітрових турбін, наведено типові несправності, які виникають у вітрових турбінах, і вказані їх причини. Дані про конкретні випадки були зібрані із зазначенням попередніх відмов, небезпек і ризиків, а також їх причин. Всі ці дані отримані з 2010 по 2024 рік про відмови, ризики, збитки та небезпечні ситуації, які стосувалися експлуатації морських та наземних вітрових турбін.

2. Описано методику аналізу та оцінки даних, отриманих в результаті теоретичного дослідження аварій вітрогенераторів. Цей аналіз ґрунтується на загальнодоступних новинах про аварії та ризики у світі.

3. Підсумовано дані, зібрані та згенеровані під час дослідження, такі як частота відмов, розподіл по країнах, фактори ризику, з табличним та графічним аналізом.

4. Встановлено, що відмови лопатей і генератора відбуваються у 29 % випадків кожна. Конструкційні відмови відбуваються у 24 % випадків. Влучання блискавки становлять – 8 %, відмови редукторів – 6 %, утворення льоду в турбінах – 3 %, а несправності, спричинені впливом температури та навколишнього середовища – 1 %.

5. Причини відмов лопатей: 76 % пов'язані зі штормом, 11 % – з несправностями болтів і кріплень, 9 % – з втомою матеріалу і 2 % – з несправностями кабелів і датчиків.

6. Причини відмов генераторів через: замикання та електричні несправності складає 28 %, шторми – 22 %, механічні несправності – 11 %, людські помилки – 6 % і коливання енергії – 5 %.

7. Причин конструкційних відмов: шторм – 63 %, механічні несправності, такі як неспіввісність і несправності стабілізації, становлять 15 %, не якісне технічне обслуговування – 8 %, 4 % – це зіткнення, а 1 % – людський фактор.

8. Основною проблемою, що призводить до виходу з ладу коробки передач, є витік мастила – 40 %. Гальмівна система та втома матеріалів складають 20 %, несправності підшипників – 15 %, а поломка та ризиковані ситуації внаслідок шторму – 5 %.

9. Розроблено рекомендації та заходи, які можуть бути вжиті для обмеження відмов відповідно до результатів аналізу. У цьому дослідженні були розглянуті ситуації відмов морських і наземних вітрових турбін під час експлуатації, а також проведений аналіз відмов на користь досліджень у галузі вітроенергетики.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [18]:

- при проектуванні – дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;
- при виготовленні – застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;
- при збірці та монтажі – точним дотриманням технології;
- при експлуатації – своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації, тощо.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел

енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів) засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромок і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання

Для попередження про небезпеку застосовують звукові, світлові і кольорові сигнали. Сигнальні пристрої встановлюються в зонах видимості і слухового відчуття обслуговуючого персоналу. Сигнали небезпеки повинні чітко сприйматися у виробничій обстановці [18].

Нормативами визначаються сигнальні і розпізнавальні кольори. Основними сигнальними кольорами є червоний – забороняючий, засвідчуючий про безпосередню небезпеку, жовтий – зосереджуючий увагу і попереджуючий про можливу небезпеку і зелений – означаючий безпеку.

Розпізнавальними кольорами вважають зелений, червоний, синій, жовтий, оранжевий, фіолетовий, коричневий, сірий.

Розпізнавальні кольори наносять на технологічне підйом-но-транспортне обладнання, трубопроводи, елементи будівельних конструкцій та інші споруди.

Сигнально-попереджувальним фарбуванням (жовтими і чорними смугами) відмічаються елементи будівельних конструкцій і міжцехового транспорту. Так, жовто-чорною смугою позначаються низькі балки, виступи і

перепади у площині підлоги, краю люків і колодязів, кабіни і перила кранів, вантажні гаки, бічні поверхні електрокарів, навантажувачів, візків, стріл автокранів.

4.3 Особливості проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при ліквідації наслідків великих виробничих аварій і катастроф

Кожна конкретна аварія викликається сукупністю ряду причин і несприятливих факторів. Аналіз показує, що аварії виникають, головним чином, у результаті слабкої навченості персоналу, допущеної недбалості, порушенні технологічного процесу виробництва і правил техніки безпеки. Вивчення причин аварій і всебічна оцінка ступеня небезпеки дозволяють правильно визначити заходи щодо їх попередження, передбачити необхідні заходи захисту людей і зниження збитків [19].

Основними заходами щодо ліквідації наслідків великих аварій є: оповіщення про небезпеку робітників та службовців, формувань ЦО і населення, що проживає поблизу об'єкта; комплексна розвідка об'єкта, на якому відбулася аварія; порятунк людей з-під завалів, зі зруйнованих і пошкоджених будинків та споруд, надання медичної допомоги постраждалим і евакуація їх у лікувальні установи; гасіння пожеж; локалізація аварій на комунально-енергетичних мережах, які перешкоджають веденню рятувальних робіт; улаштування проїздів і проходів до місць аварій; обвалування нестійких конструкцій, розбирання завалів, демонтаж збереженого устаткування, якому загрожує небезпека; організація комендантської служби.

Швидке проведення рятувальних робіт і оперативна ліквідація наслідків аварії вимагають значних сил і засобів, для цих цілей залучаються спеціальні (об'єктові) і територіальні формування загального призначення і служб.

При ліквідації наслідків виробничих аварій застосовуються інженерна й інша спеціальна техніка: крани, бульдозери, екскаватори, компресорні станції, самоскиди. Важкі тягачі з тросами для розтягування і розведення великих

залізобетонних конструкцій, вертольоти великої вантажопідйомності і металорізальні установки.

Використовуються також засоби малої механізації: домкрати, лебідки, мотопили, газорізи, електронасоси й ін.

Рятувальні роботи в місцях аварії, як правило, проводяться в умовах загазованості, а при пожежах задимленості і високих температур; щоб забезпечити безперервність роботи з наростаючим темпом, сили ЦО поділяють на зміни і виділяють резерви.

У залежності від характеру і масштабу аварії керівництво ліквідацією наслідків здійснює або керівник даного підприємства, який є одночасно і начальником ЦО, або голова спеціально створюваної надзвичайної комісії. На кожну ділянку призначається керівник з числа відповідальних посадових осіб об'єкта або керівників ЦО і фахівців служб ЦО. Він повинен поставити завдання формуванням, вказати терміни і способи їх виконання, визначити порядок матеріального, технічного й інших видів забезпечення, організувати роботи, своєчасну зміну, відпочинок і харчування особового складу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано будову вітрогенератора, призначення та особливості його ключових компонентів таких як фундамент, вежа, ротор, гондола і генератор.

2. Для того, щоб дослідити передачу навантаження від ротора на решту турбіни, розглянуто різні навантаження на лопаті. В основному це аеродинамічна сила, вага і відцентрові сили, коли турбіна працює на постійній швидкості та сили інерції.

3. Проведено аналіз можливих несправностей лопатей, генератора, системи рискання та редуктора і розглянуто вплив температури, льоду на лопатях, конструкційних дефектів, блискавки та інших змін навколишнього середовища на роботу вітрогенератора.

4. Наведено результат теоретичного дослідження пошкоджень вітрових турбін, наведено типові несправності, які виникають у вітрових турбінах, і вказані їх причини. Дані про конкретні випадки були зібрані із зазначенням попередніх відмов, небезпек і ризиків, а також їх причин. Всі ці дані отримані з 2010 по 2024 рік про відмови, ризики, збитки та небезпечні ситуації.

5. Встановлено, що відмови лопатей і генератора відбуваються у 29 % випадків кожна. Конструкційні відмови відбуваються у 24 % випадків. Влучання блискавки становлять – 8 %, відмови редукторів – 6 %, утворення льоду в турбінах – 3 %, а несправності, спричинені впливом температури та навколишнього середовища – 1 %.

6. Причини відмов лопатей: 76 % пов'язані зі штормом, 11 % – з несправностями болтів і кріплень, 9 % – з втотою матеріалу і 2 % – з несправностями кабелів і датчиків.

7. Причини відмов генераторів через: замикання та електричні несправності складає 28 %, шторми – 22 %, механічні несправності – 11 %, людські помилки – 6 % і коливання енергії – 5 %.

8. Причин конструкційних відмов: шторм – 63 %, механічні несправності, такі як неспіввісність і несправності стабілізації, становлять 15 %, не якісне технічне обслуговування – 8 %, 4 % – це зіткнення, а 1 % – людський фактор.

9. Основною проблемою, що призводить до виходу з ладу коробки передач, є витік мастила – 40 %. Гальмівна система та втома матеріалів складають 20 %, несправності підшипників – 15 %, а поломка та ризиковані ситуації внаслідок шторму – 5 %.

10. Відповідно до результатів теоретичних досліджень, розроблено рекомендації, які можуть бути вжиті для зменшення відмов та їх наслідків і пошкоджень: відмов лопатей, вихід з ладу генератора, руйнування конструкції, відмова редуктора, удар блискавки та вплив температури.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Перспективи розвитку електроенергетики і роль відновлювальних джерел енергії// Невідомський М.В.; Копит М.Б.; Якимчук П.М.; Горлачук М.А.; Войтович І.А./Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 груд. 2024.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2024. Т. 2. – 17-18.
2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
3. Bianchi, F. D., De Battista, H., & Mantz, R. J. (2006). Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design. Springer Science & Business Media.
4. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій – присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. – Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. – С. 294.
5. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.
6. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П.

- Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
7. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
 8. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. – Tern. : TNTU, 2020. – Vol 99. – No 3. – P. 124-132.
 9. Elibuyuk, U., & Ucgul, I. (2014). Wind turbines, types and methods of wind energy storage. Suleyman Demirel University Journal of Yekarum, 2(3), 1-14.
 10. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. – Т. : ТНТУ, 2020. – С. 204.
 11. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021
 12. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.

13. Van Bussel, G. J. W., & Zaaijer, M. B. (2001, March). Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study. In Proceedings of MAREC (Vol. 2001).
14. Hemami, A. (2012). Wind turbine technology. Cengage Learning.
15. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 70.
16. Wind turbine to blame for fire that threatened dozens of homes <https://610kona.com/wind-turbine-to-blame-for-fire-that-threatened-dozens-of-homes/>
17. Nuon says bye to Lely <https://renews.biz/40655/nuon-says-bye-to-lely/>
18. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С.Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.
19. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.