

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерної механіки  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка вітроенергетичної установки

Назва теми

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр, назва


Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Спеціалізація Енергетичний менеджмент

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
курсу група ЕМ-21-1

  
Підпис

Шевчук І. О.

Ініціали, прізвище


Керівник

  
Підпис, дата

Тимошук О. Г.

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Тундик

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

Неймарк В.С.

Ініціали, прізвище

2 06 2015 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Освітня програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2.06.2015

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Шевчук Ілля Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка вітроенергетичної установки

керівник роботи Тимошук Олександр Григорович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 01 2015 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи енергетичні та технічні характеристики вітроенергетичної установки

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз інформаційних джерел вітроенергетичних установок. 2. Проектування основних вузлів вітроенергетичної установки. 3. Розрахунки що підтверджують працездатність ВЕУ. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Вітроенергетичні установки (ДО, А1). 2. Вітроелектрична установка (ГК, А1). 3. Гондола вітроустановки (ДІ, А1). 4. Вітроустановка (Е2, А1). 5. Результати розрахунків основних параметрів і навантажень ВЕУ (РР, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 11.05.25р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз інформаційних джерел вітросенергетичних установок	до 15.05.25р.	
2 Проектування основних вузлів вітросенергетичної установки	до 29.05.25р.	
3 Розрахунки, що підтверджують процесоздатність ВЕС	до 8.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 14.06.25р.	

Студент

Керівник роботи

І.О.  
Підпис  
О.Г.  
Підпис

Шевчук І. О.  
Ініціали, прізвище  
Тимошук О. Г.  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Шевчук Ілля Олександрович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка вітроенергетичної установки

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 62

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: Метою бакалаврської роботи було проєктування малогабаритної вітроенергетичної установки потужністю 2-3 кВт, адаптовану для встановлення на дах приватної або промислової будівлі. В першому розділі проведено аналіз вітроустановок, їх різновидність та компоненти. В другому розділі спроектовано вітроенергетичну установку. В третьому розділі проведено розрахунки, що підтверджують працездатність та стійкість конструкції

Підпис студента 

" 2 " 06 20 25 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 7 від " 28 " 06 20 25 р.

Оцінка проєкту ЕК 4,5В

Рекомендації ЕК —

Особливі відмітки —

Технічний секретар 

" 28 " 06 20 25 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....	7
1.1 Класифікація вітроенергетичних установок .....	7
1.2 Схеми генерації енергії вітроенергетичними установками .....	17
1.3 Електротехнічні системи вітрових установок .....	21
Висновок до першого розділу .....	26
2 ПРОЕКТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	27
2.1 Вибір конфігурації та основних параметрів ВЕУ .....	27
2.2 Проектування роторної системи.....	30
2.3 Механічна передача та електрогенератор.....	35
2.4 Гондола, система орієнтації та гальмування .....	38
2.5 Проектування башти та фундаменту.....	43
2.6 Система автоматичного керування та електропостачання .....	48
Висновок до другого розділу .....	50
3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВЕУ .....	52
3.1 Розрахунок енергетичних характеристик установки .....	52
3.2 Механічне навантаження та перевірка несучих елементів.....	54
3.3 Динамічні характеристики: момент інерції ротора .....	58
Висновок до третього розділу.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	61
ДОДАТКИ.....	63

<b>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</b>				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Шевчук І. О.	<i>Ш</i>	
Перевір.		Тимошук О. В.	<i>Т</i>	
І.контр.		Пундик С. І.	<i>П</i>	
Затвер.		Неймак	<i>Н</i>	
<i>Розробка вітроенергетичної установки</i>				
		Літера	Арк.вш	Арк.внів
			4	63
<i>ХНУ, зр. ЕМ-21-1</i>				

## ВСТУП

У XXI столітті питання енергетичної безпеки, економічної ефективності та екологічної відповідальності набули стратегічного значення. З огляду на зростання вартості традиційних енергоресурсів та глобальні екологічні виклики, людство дедалі активніше звертається до використання відновлюваних джерел енергії. Серед них важливу роль відіграє вітрова енергетика — як один із найбільш доступних, зрілих і перспективних напрямів "зеленої" енергетики.

На сьогодні розвинуті країни активно інвестують у великі вітропарки, однак зростає і інтерес до децентралізованих рішень — автономних вітроустановок для приватного сектору, фермерських господарств, невеликих підприємств. У цьому контексті актуальним є створення компактних дахових вітроустановок, здатних забезпечити користувача електроенергією у межах базового споживання або у поєднанні з акумуляторними системами. Саме таке технічне рішення розроблено в межах цієї дипломної роботи.

Об'єктом дослідження є вітроенергетична установка горизонтального типу з ротором на три лопаті. На відміну від промислових вітряків, ця установка адаптована для розміщення на дахах будівель, що потребує особливого підходу до габаритів, кріплення, віброізоляції, шумозахисту та безпеки експлуатації.

Метою дипломної роботи є розробка вітроустановки потужністю до 2 кВт, що відповідає умовам дахового монтажу, з урахуванням усіх технічних, конструктивних і енергетичних вимог.

Для досягнення мети були зроблені наступні завдання:

- проаналізовано сучасні типи вітрових установок, їх конструктивні особливості та застосування;
- визначено оптимальні параметри установки (діаметр ротора, швидкості вітру, конфігурацію генератора);
- виконано підбір і обґрунтування основних компонентів: лопатей, гондоли, генератора, елементів передавання моменту, башти та фундаменту;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

- спроектовано систему електроживлення, регулювання навантаження та гальмування;
- виконано технічні та розрахункові обґрунтування працездатності;
- розроблено базові технічні креслення та модель в середовищі SolidWorks.

Конструкція передбачає використання гондоли із прямим приводом на генератор, резистивного електронного гальмування як захисту від перенапруги, а також простого хвостового орієнтуючого механізму замість складних систем повороту. Встановлення реалізується через фланцеве кріплення до металевої труби, що жорстко монтується до даху з урахуванням динамічних навантажень.

Розрахунки підтвердили, що при середній швидкості вітру 8 м/с установка здатна стабільно генерувати до 2 кВт електроенергії з запасом міцності усіх ключових елементів. Конструкція має хороший баланс між потужністю, простою обслуговування, вартістю реалізації та універсальністю у застосуванні.

Таким чином, у межах цієї роботи створено повноцінний інженерний проєкт малої вітрової установки, здатної доповнити або частково замінити централізоване електропостачання на рівні побутового або комерційного споживача.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

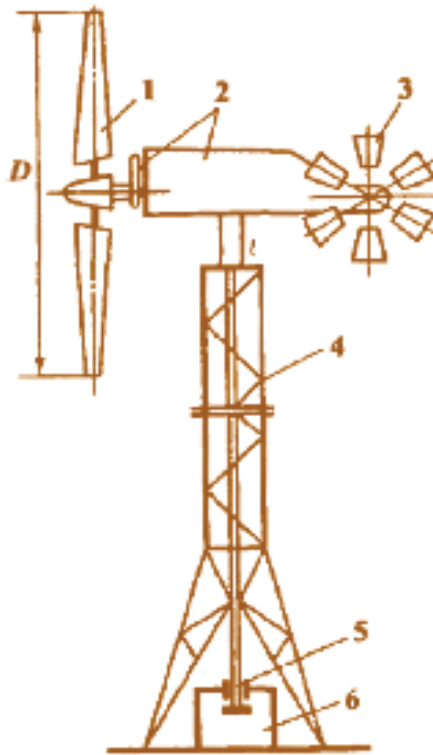
## 1.1 Класифікація вітроенергетичних установок

Вітроенергетична установка (ВЕУ) — це комплекс обладнання та споруд, що спільно забезпечують перетворення енергії вітру в інші види енергії. До складу ВЕУ входять вітрогенератор і вітродвигун. Основною частиною є саме вітрогенератор, який включає вітродвигун, систему передавання вітрової енергії до навантаження (споживача) та сам споживач, до якого можуть належати електрогенератор, водяний насос, нагрівальний елемент тощо. Вітродвигун виконує функцію перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну енергію обертального руху. Рух, який створює вітродвигун, може бути різного типу. Переважна більшість сучасних вітродвигунів працює на основі обертального руху, однак також існують ідеї (іноді втілені на практиці) щодо використання коліального або іншого характеру руху.

Загальний принцип дії вітроустановки полягає в тому, що під впливом вітру обертається лопатеве вітроколесо, яке передає крутний момент через передавальний механізм на вал генератора, що, у свою чергу, виробляє електроенергію.

Розрізняють два основні типи конструкцій ВЕУ: з вертикальною та горизонтальною віссю обертання. Схематична конструкція ВЕУ з горизонтальною віссю подана на рисунку 1.1. Основними її елементами є вітроприймальний пристрій (лопати), редуктор, який передає обертання до електрогенератора, сам генератор, а також опорна башта. Вітроприймальний пристрій у поєднанні з редуктором утворює вітродвигун. Завдяки спеціальній геометрії лопатей у потоці повітря виникають несиметричні аеродинамічні сили, які й створюють крутний момент.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



1 – робоча лопать; 2 – гондола; 3 – віндроза; 4 – башта; 5 – вал; 6 – електрогенератор.

Рисунок 1.1 - Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Вітроустановки з вертикальною віссю обертання мають низку переваг порівняно з горизонтально-осьовими аналогами. Вони не потребують спеціального орієнтування на напрям вітру, мають простішу конструкцію та зазнають менших гіроскопічних навантажень, що зменшує напруження в лопатях, передавальних механізмах та інших елементах системи. Крім того, така конструкція дозволяє розташувати редуктор і генератор у нижній частині башти. Схематична будова ВЕУ з вертикальною віссю обертання наведена на рисунку 1.2.

Серед основних недоліків вертикально-осьових вітроенергетичних установок можна виділити наступне:

- підвищена ймовірність виникнення автоколивань, які можуть призводити до механічних пошкоджень;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

– наявність пульсацій крутного моменту, що негативно впливає на стабільність потужності та робочі характеристики генераторного обладнання.

Однією з основних технічних проблем, виявлених під час нещодавніх випробувань ВЕУ типу Дар'є та Н-роторів потужністю 5 МВт, став підп'ятниковий підшипник головного вала. Його пошкодження часто призводило до виходу з ладу всієї установки, що стало основною причиною згорання проєктів зі створення потужних ВЕУ з вертикальною віссю. Водночас розробка малопотужних установок цього типу продовжується досить успішно.

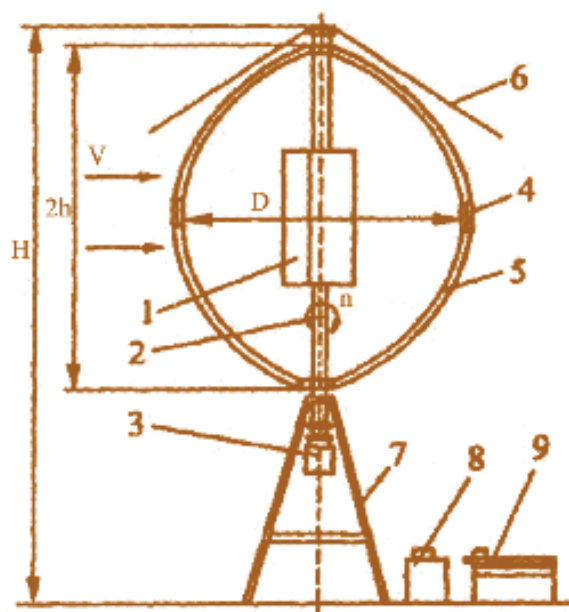


Рисунок 1.2 - Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання: 1 – стартер; 2 – вісь; 3 – електрогенератор; 4 – гальмівний пристрій; 5 – робоча лопать; 6 – розтяжка; 7 – рама; 8 – перетворювач напруги; 9 – акумулятор;  $V$  – швидкість вітру;  $H$  - висота;  $h$  – половина висоти лопаті;  $n$  – швидкість обертання лопаті;  $D$  – діаметр розгортки лопатей

Класифікація вітроустановок залежно від потужності генератора наведена у таблиці 1.1 разом із відповідними параметрами та призначенням.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Таблиця 1.1 - Класифікація вітроустановок за потужністю генератора

Клас	Потужність генератора	Діаметр ротора	Висота башти	Середня річна виробнича потужність	Призначення
I	Менше 10 кВт	до 5 м	до 10 м	5000 - 10000 кВт·год	Домашнє використання
II	10 кВт — 100 кВт	5 - 15 м	10 - 30 м	10000 - 100000 кВт·год	Малий комерційний масштаб
III	100 кВт — 1 МВт	15 - 30 м	30 - 50 м	100000 - 1000000 кВт·год	Малий середній комерційний масштаб
IV	1 МВт - 5 МВт	30 - 60 м	50 - 80 м	1000000 - 5000000 кВт·год	Середній комерційний масштаб
V	5 МВт - 20 МВт	60 - 120 м	80 - 120 м	5000000 — 20000000 кВт·год	Великий комерційний масштаб
VI	Більше 20 МВт	понад 120 м	понад 120 м	Понад 20000000 кВт·год	Великий комерційний масштаб

Потужність вітроенергетичної установки пов'язана зі зміною параметрів та потужності джерела енергії – вітру.

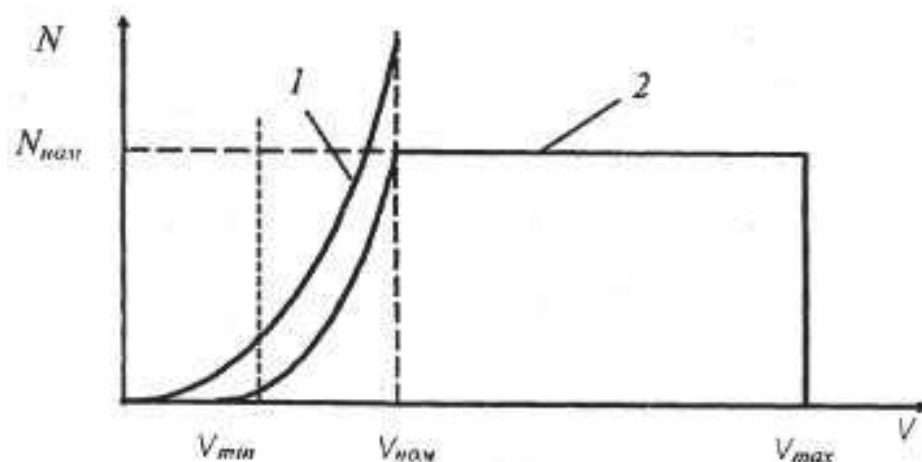


Рисунок 1.3 - Енергетична характеристика вітрогенератора

Функція потужності  $N(V)$ , яка визначається за формулою показана на рис.1.3 за допомогою кривої 1. Однак на практиці енергетична характеристика ВЕУ визначається за допомогою кривої 2, адже як тільки швидкість вітру опускається нижче мінімальної робочої, установка перестає працювати. Як правило, мінімальну швидкість визначають наступним чином:

$$V_{min} = 0,5 * V_{ном.} \quad (1.1)$$

Де  $V_{min}$  -- мінімальна робоча швидкість, м/с;  $V_{ном.}$  – номінальна робоча швидкість, м/с.

З графіка енергетичної характеристики вітрогенератора стає очевидним той факт, що хоча швидкість вітру і зростає, а його енергія збільшується, однак остання не може бути використана повною мірою.

Для розрахунку енергії, яку здатна виробити вітроенергетична установка, необхідно дані про розподіл швидкості вітру та потужностну характеристику установки. Існують два основні підходи до визначення цієї енергії:

а) застосування стандартних функцій розподілу швидкості вітру, зокрема двопараметричної функції Вейбулла або її спрощеного варіанту — однопараметричної функції Релея. Цей метод ґрунтується на математичному моделюванні й дозволяє оцінити прогнозовану вироблену енергію залежно від параметрів функції розподілу та потужнісної характеристики ВЕУ;

б) використання даних реальних вимірювань швидкості вітру з подальшим побудуванням функції розподілу за окремими інтервалами. У цьому разі швидкість вітру в кожному з діапазонів приймається сталою, що спрощує процес розрахунку. Такий підхід спирається на фактичні дані, отримані в конкретному місці, і забезпечує вищу точність оцінки енерговиробітку.

Обидва способи мають свої переваги й обмеження. Вибір конкретного методу залежить від наявності вхідних даних, необхідної точності обчислень, умов експлуатації установки та інших чинників.

Якщо відома повторюваність вітрових швидкостей, тоді кожному значенню швидкості та відповідному часу повторення можна поставити у відповідність певне питоме значення енергії. На основі цього формується графік питомої потужності вітру.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

12

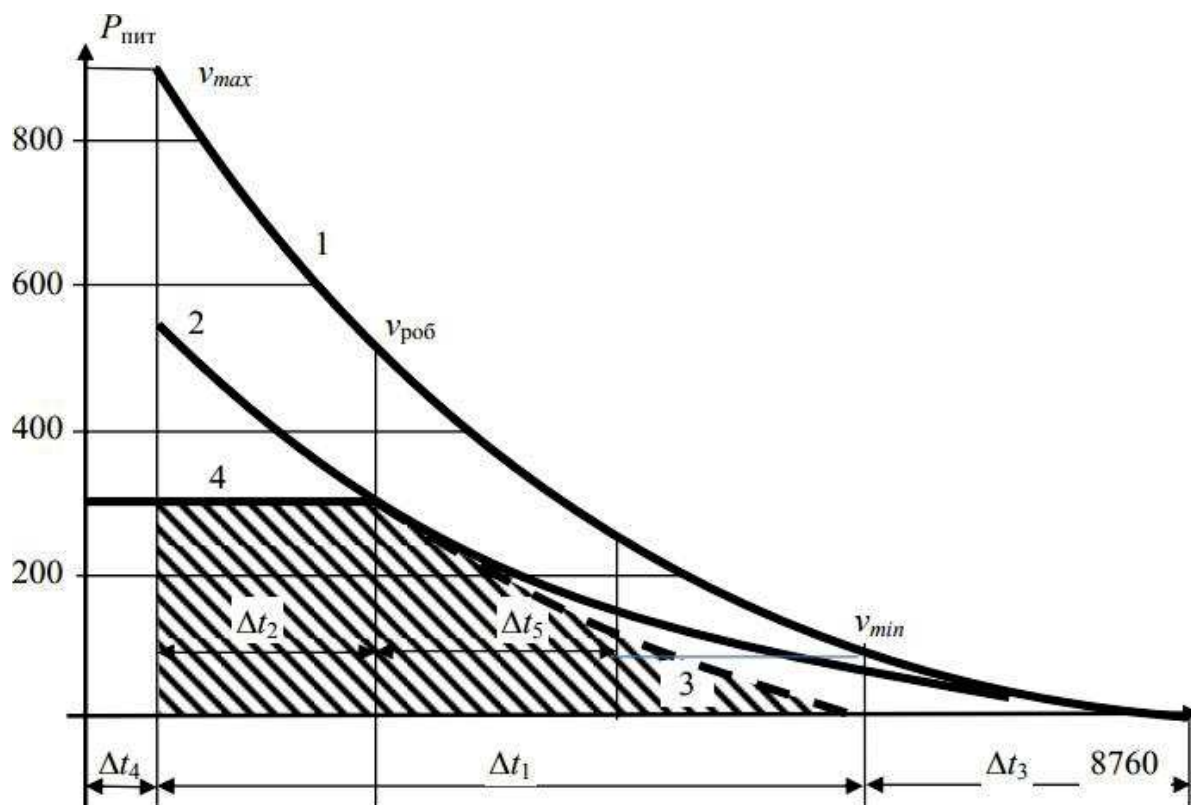


Рисунок 1.4 -Теоретичне розподіл питомої потужності вітру (1), питомої потужності на валу вітроколеса (2) і фактичний розподіл потужності ВЕУ (3, 4)

У таблиці 1.2 наведені виконані розробниками вітротурбіни дані розрахунку виробітку електричної енергії ВЕУ REpower 45/600, потужністю 600 кВт. Розподіл швидкості вітру за діапазонами взято на підставі вимірів для середньорічної швидкості вітру 7 м/с. Характеристика потужності взята за даними випробувань цієї ВЕУ протягом року. Розрахункова річна вироблення електроенергії склала 1822 тис. кВт·год, що відповідає достатньо високому коефіцієнту використання встановленої потужності рівному 30,4%. Це зайвий раз свідчить про те, що при середньорічній швидкості вітру 7 м/с ефективність вітроустановки не підлягає сумніву.

Таблиця 1.2. Розрахунок виробництва електроенергії вітроустановкою типу REpower 48/600 при середньорічній швидкості вітру 7 м/с.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Таблиця 1.2 — Розрахунок виробництва при середньорічній швидкості вітру

Швидкість вітру, м/с	Імовірність швидкості вітру, %	Кількість годин у році, год	Потужність ВЕУ, кВт	Виробництво електроенергії, кВт год
1	2,25	197,1	0	0
2	5,3	464,28	0	0
3	6,9	604,44	0	0
4	8,7	762,12	20,8	15852
5	10,5	919,8	52,1	47921
6	11,8	1033,68	88,5	91480
7	12,2	1068,72	151,2	161590
8	10,9	954,84	239,8	228970
9	8,5	748,6	317,6	236484
10	7,0	613,2	417,1	255765
11	5,2	455,52	490	223204
12	3,7	324,12	556	180210
13	2,7	236,52	597	141202
14	1,7	148,92	624	92926
15	1,2	105,12	641	67381
16	0,7	61,62	627	38447
17	0,4	35,04	620	21724
18	0,2	17,5	616	10792
19	0,1	8,76	614	5378
20	0,05	4,4	606	2654
Разом	100	8760	-	1822010

Основною відмінністю між вітровою та тепловою енергетикою є нерівномірність потоку первинної енергії. Ця нерівномірність створює проблеми в узгодженні графіків генерації та споживання енергії.

Нерівномірність вітрового потоку, а отже й потужності, яку генерує вітроенергетична установка (ВЕУ), можна спостерігати на основі довготривалого досвіду країн з високою часткою ВЕУ в енергетичній системі, як показано на рисунку 1.5.

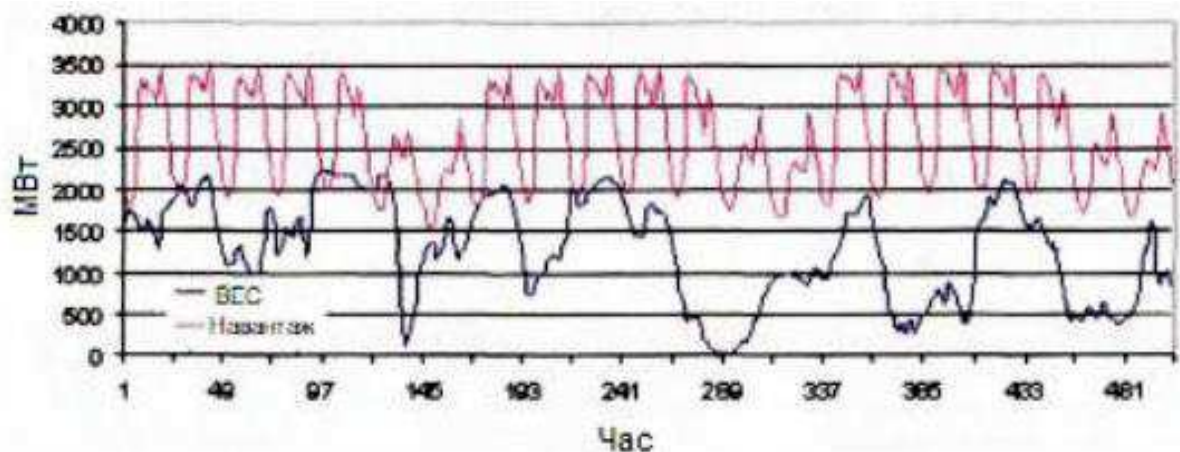


Рисунок 1.5 - Графіки навантаження та генерації ВЕС загальною встановленою потужністю 2400 МВт у західній частині Данії. У період 128-139 год. - регіональний шторм 8 січня 2005 р.

Швидкість вітру на різних висотах у земній атмосфері є випадковою величиною, яка змінюється як у просторі, так і в часі. Вона залежить від низки факторів: особливостей місцевості, пори року та поточних метеоумов. Всі процеси, що пов'язані з використанням вітрової енергії — зокрема генерація електроенергії за допомогою ВЕУ — мають стохастичний характер і супроводжуються статистичними відхиленнями параметрів.

Для оцінки миттєвої швидкості вітру необхідно створити ймовірнісну модель цього випадкового процесу шляхом поділу часового ряду на інтервали. В межах кожного такого інтервалу допускається припущення про стаціонарність,

тобто вважається, що властивості процесу залишаються незмінними в часі. Тривалість стаціонарного інтервалу залежить від характеру процесу і може коливатися від доби до місяця або року.

З метою упорядкування параметрів вітрової енергії формується вітроенергетичний кадастр, який включає сукупність аерологічних та енергетичних характеристик вітру. Це дає змогу оцінити потенційну енергетичну цінність вітру, а також обґрунтовано вибирати технічні параметри і режими роботи вітроустановок.

Основні джерела даних для побудови кадастру вітрової енергії:

1. метеостанції, що проводять вимірювання кліматичних параметрів, включаючи швидкість вітру, як правило, 4 рази на добу. Сучасні станції ведуть спостереження в 8 румбах і мають багаторічні архіви даних;
2. автоматизовані метеостанції безперервного спостереження, які встановлюються безпосередньо на потенційних майданчиках для ВЕУ;
3. аерологічні станції, що здійснюють запуск зондів та метеорологічних куль для збору даних на різних висотах атмосфери.

Для отримання достовірних середніх швидкостей вітру, які визначають його енергетичний потенціал, важливо забезпечити репрезентативність вибірки — тобто достатній обсяг і тривалість вимірювань. Зі збільшенням кількості даних підвищується точність оцінки середніх значень. Це оцінюється через коефіцієнт варіації середніх швидкостей, який знижується при подовженні періоду усереднення: наприклад, середньорічні швидкості мають менший розкид, ніж середньомісячні.

Однак середні значення не завжди повністю відображають повторюваність конкретних швидкостей. Так, коефіцієнт варіації середньорічної швидкості вітру зазвичай становить до 15% від багаторічної норми, але частка часу, протягом якого спостерігаються певні швидкості, може змінюватися на  $\pm 50\%$ .

Повторюваність вітрових швидкостей — один із ключових параметрів вітроенергетичного кадастру. Вона визначає, яку частину часу протягом аналізова-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

ного періоду вітер мав певну швидкість, що напряму впливає на доцільність та ефективність використання вітроустановок. Оскільки швидкість і напрям вітру постійно змінюються, потужність та продуктивність ВЕУ залишаються нестабільними.

## 1.2 Схеми генерації енергії вітроенергетичними установками

Можливі технологічні схеми ефективного отримання електричної енергії за рахунок енергії вітру для автономної, мережевої та комбінованої схеми ВЕУ подано на рис. 1.6-1.12.

Схеми 1.6-1.7 стосуються генерування електроенергії постійного струму. Як основний генеруючий засіб може бути використано генератор постійного або змінного струму. У разі використання генератора змінного струму його обладнують випрямлячем. Вироблена енергії подається через контролер на акумулятор або безпосередньо до споживачів.

Основною перевагою цього способу генерування електроенергії є відсутність потреби в регулюванні частоти обертання ротора.

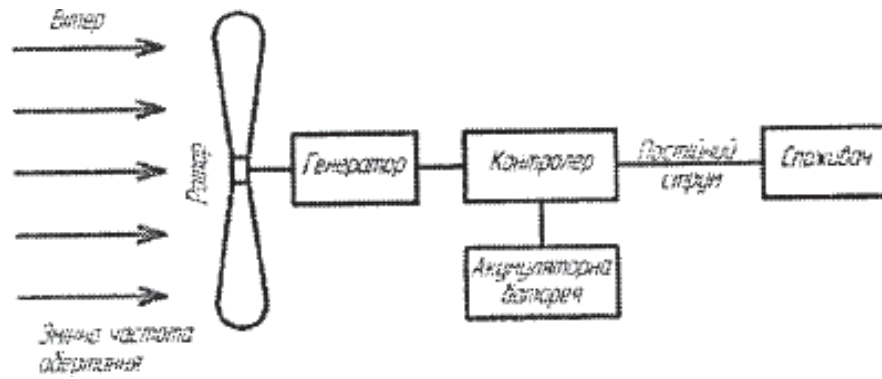


Рисунок 1.6 - Вітроелектрична установка постійного струму без баластного навантаження

У разі необхідності живлення автономного споживача змінним струмом до складу системи вводиться інвертор (рис. 2.3). В такому разі частота обертання вітроколеса не має визначального значення, оскільки генератор навантажується на акумулятор, а з акумулятора здійснюється відбір потужності до споживача.

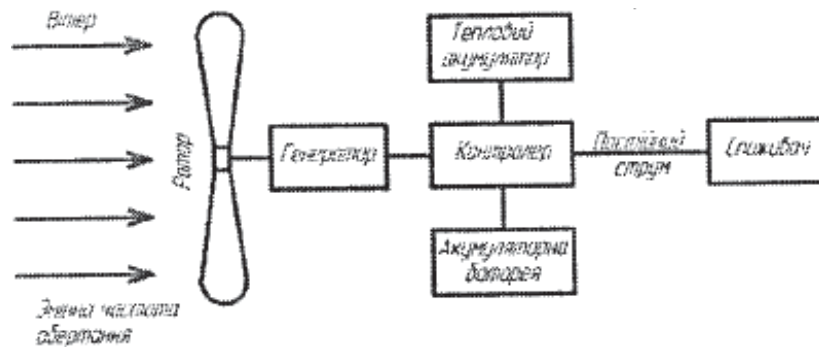


Рисунок 1.7 - Вітроелектрична установка постійного струму з баластним навантаженням

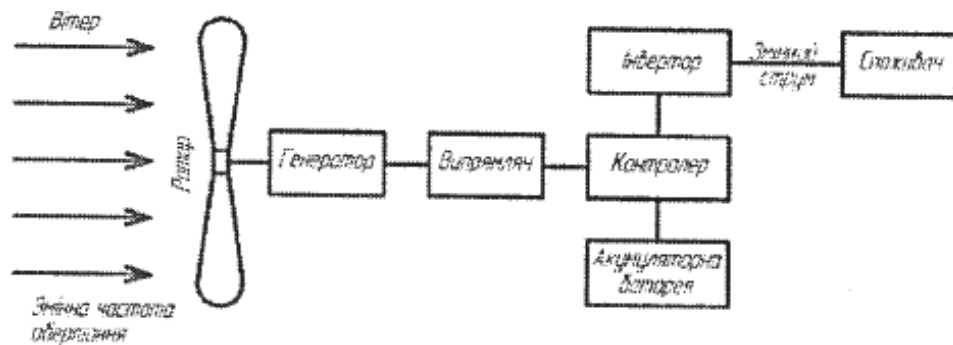


Рисунок 1.8 - Вітроелектрична установка змінного струму

При побудові вітроустановки для роботи на електричну мережу її конструкція максимально проста (рис. 2.4). В цьому випадку необхідною умовою є постійна частота обертання ротора при використанні синхронного генератора або близька до постійної при використанні асинхронного генератора.

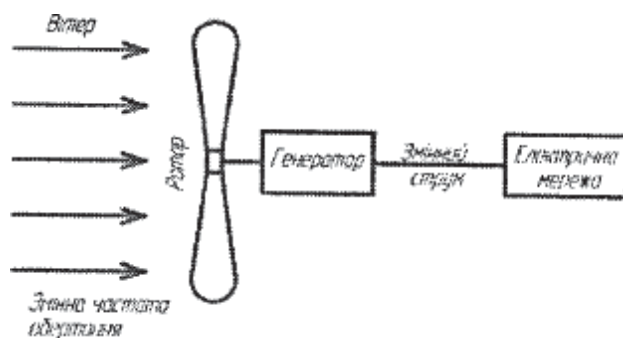


Рисунок 1.9 - Мережева вітроелектрична установка змінного струму

Введення до структури вітроелектричної установки ланки постійного струму позбавляє необхідності регулювання частоти обертання ротора, а синхронізація з мережею здійснюється мережевим інвертором (рис. 2.5).

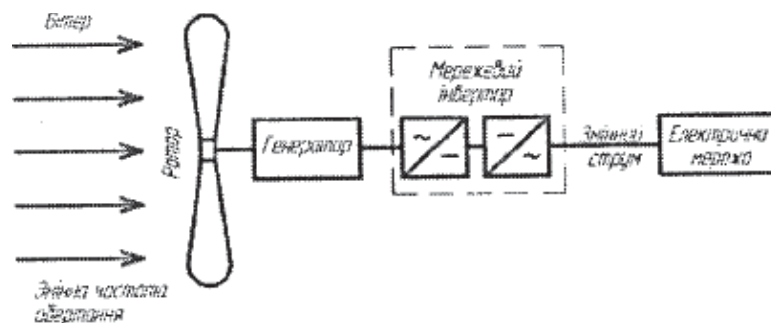


Рисунок 1.10 - Мережева вітроелектрична установка змінного струму з ланкою постійного струму

Використовуються також комбіновані електрогенерувальні системи. У схемі на рис. 1.11 вітроустановка використовується як основне джерело електроенергії. В якості резерву може бути використано дизель-генератор і/або зовнішня електрична мережа. Перемикання між джерелами здійснюється за допомогою АВР. При використанні лише дизель-генератора система може працювати в автономному режимі без приєднання до електричної мережі.

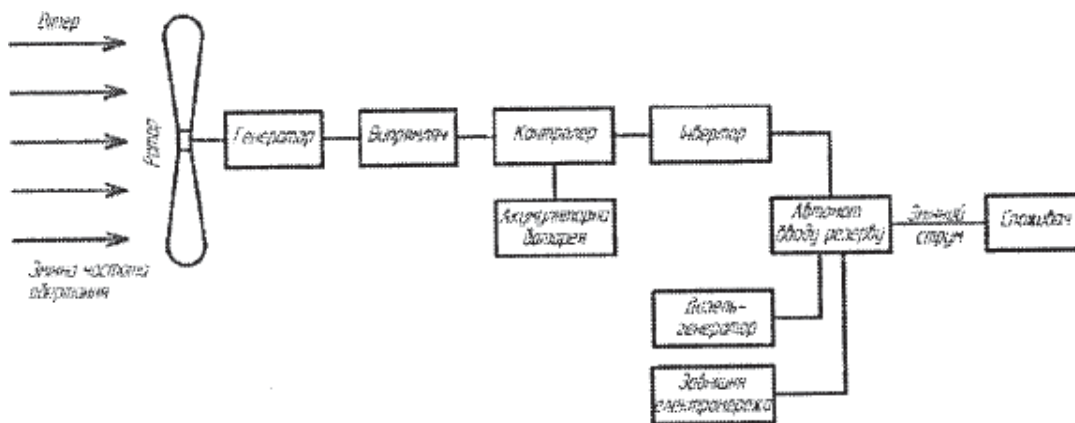


Рисунок 1.11 - Автономна гібридна система, побудована на базі вітроелектричної установки з додатковими джерелами енергії

Система зображена на рис. 1.12 відноситься до автономних з гібридною

структурою. Вітроелектрична установка використовується як основне джерело електроенергії, а фотоелектрична установка – як додаткове джерело.

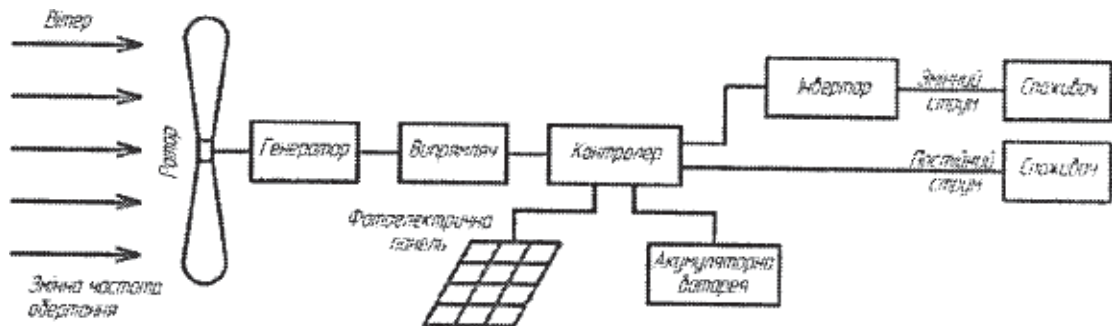


Рисунок 1.12 - Автономна гібридна вітро-сонячна система електропостачання

### 1.3 Електротехнічні системи вітрових установок

Перевагою електричних генераторів постійного струму є простота регулювання, відсутність випрямлячів. Основним недоліком є складніша конструкція, більша металомісткість, низька надійність за рахунок колектора.

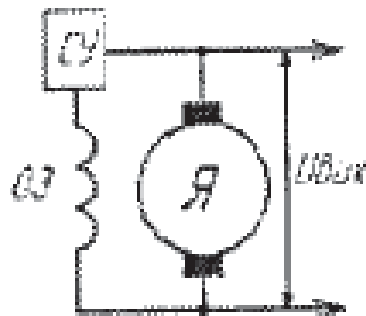


Рисунок 1.13 - Колекторний генератор постійного струму

Електричний асинхронний генератор змінного струму з реактивним збудженням має найпростішу будову, але для забезпечення найбільш ефективної роботи потребує налаштування ємності конденсаторів до зміни навантаження.

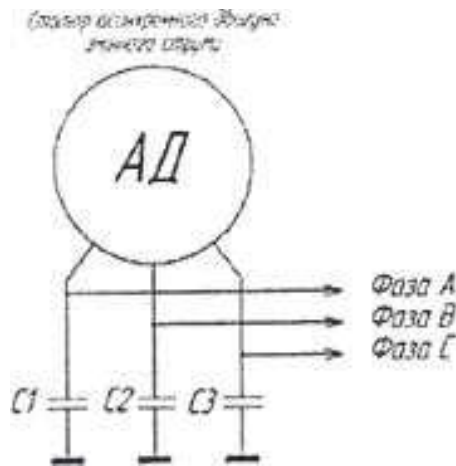


Рисунок 1.14 - Асинхронний генератор змінного струму

Асинхронні машини порівняно прості за конструкцією, дуже надійні в експлуатації, мають досить високі енергетичні показники і невисоку вартість. Значний інтерес останніми роками викликає застосування асинхронних машин в генераторному режимі для забезпечення живленням, як споживачів трифазного струму, так і споживачів постійного струму через випрямні пристрої. У певних умовах експлуатації автономних джерел електроенергії застосування асинхронних генераторів (АГ) виявляється переважним.

На рис. 1.14 показано електричний генератор змінного струму зі збудженням від постійних магнітів. Безконтактні синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ) мають просту електричну схему, не споживають енергії на збудження і мають підвищений ККД, відрізняються високою надійністю роботи, менш чутливі до дії реакції якоря, ніж синхронні генератори з електромагнітним збудженням. Їх недоліки пов'язані з невисокими регульовальними властивостями через те, що робочий потік постійних магнітів не можна змінювати в широких межах. Проте у багатьох випадках ця особливість не є визначальною і не перешкоджає широкому їх застосуванню.

Більшість регіонів України характеризуються малою середньорічною швидкістю вітру 3-5 м/с. тому більшість часу ВЕУ працюють в режимі часткової по-

тужності. В таких режимах для забезпечення номінальної вихідної напруги електричних генераторів з електромагнітним збудженням необхідно забезпечувати максимальний електромагнітний потік і відповідно максимальний струм збудження, що суттєво знижує загальний ККД установки.

Тому в умовах малих середньорічних швидкостей доцільно використовувати генератори зі збудженням від постійних магнітів.

Також у зв'язку із нестабільністю вітрового потоку і відповідно змінній потужності ВЕУ, яка не завжди узгоджується із споживанням, доцільно використовувати ланку постійного струму з акумулятором з регулюванням напруги заряджання і зарядного струму.

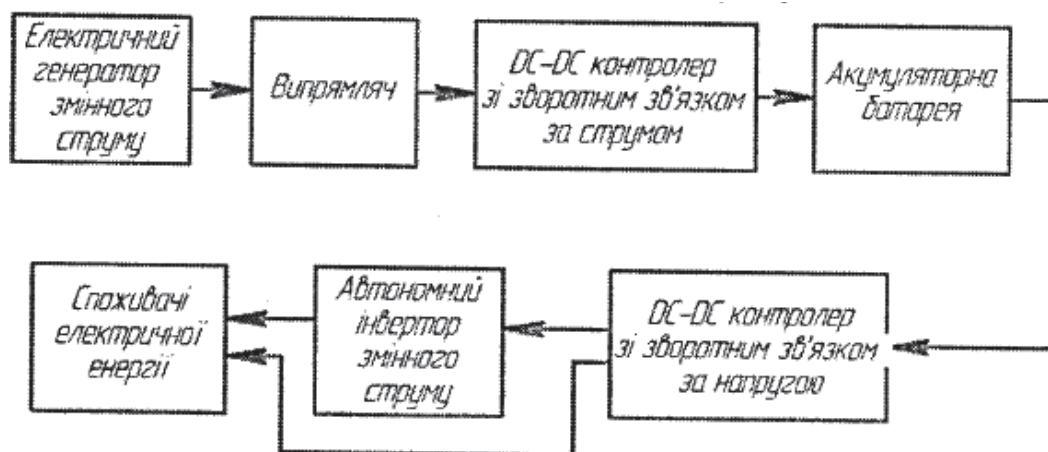


Рисунок 1.4. Електротехнічна система автономної ВЕУ

У вітроустановках необхідно використовувати системи, які автоматично регулюють вихідну потужність в залежності від швидкості і сили вітру. Ці процедури спрямовані на забезпечення стабільного рівня потужності та необхідних якісних характеристик електроенергії, яка подається в електричну мережу.

Регулювання шляхом зміни кута нахилу лопатей ротора полягає у зміні кута атаки вітру на лопаті ротора, сприяючи тим самим підтримці сталої швидкості обертання. Система автоматичного регулювання, опираючись на дані про швидкість вітру та вироблену потужність, виконує зміни кута нахилу лопатей ротора

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

відносно напрямку вітру за допомогою сервомеханізмів. Це сприяє підтримці постійної швидкості обертання ротора, що безпосередньо впливає на стабільність та ефективність вітроустановки, а також на зниження рівня шуму.

У разі великої швидкості вітру, що може загрожувати пошкодженню вітроустановки, може бути застосоване аеродинамічне гальмування, коли лопаті ротора розташовуються в позиції "прапорця". Вузол регулювання кута нахилу лопатей ротора зазвичай розташовується в ступиці ротора, і кожна регулюється окремим гідравлічним приводом. Регулювання зміною кута установки лопатей ротора впливає на значення сил, що діють на окремі лопаті. Її істотною вадою, в порівнянні з іншими методами регулювання, є значне число рухомих частин в конструкції віротурбіни, що призводить до зниження її надійності.

Регулювання через розрідження полягає у використанні аеродинамічних характеристик лопатей ротора і відноситься до простих пасивних методів. При досягненні певної швидкості вітру за лопатями ротора виникає турбуленція, що призводить до розрідження в повітрі. Це явище відоме як "розрідження лопатей". Обертний момент, переданий генератору ротором вітродвигуна, зменшується, що в свою чергу дозволяє підтримувати відносно сталим рівень вихідної потужності вітроенергетичної установки. Лопаті мають відповідну форму і постійно закріплені в ступиці ротора.

Перевагою даного типу регулювання є відсутність багатьох додаткових компонентів та деталей системи, які пов'язані з керуванням та регулюванням кута нахилу лопатей ротора. Це значно спрощує конструкцію вітроенергетичної установки. Проте до недоліків цього методу слід віднести меншу ефективність перетворення вітрової енергії, нестабільність вихідної потужності у разі турбулентності та погіршення якості електроенергії, яку вона генерує. Цей спосіб регулювання зазвичай застосовується у вітроустановках малої потужності, де використовуються індукційні генератори та фіксована швидкість обертання.

Регулювання шляхом зміни положення гондоли в напрямку вітру означає автоматичне налаштування положення всієї гондоли, що призводить до зміни

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



Ураховуючи пульсуючий характер енергії вітру, великі вітроенергетичні установки (ВЕУ) мають працювати в режимі фіксованої частоти обертання вітродвигуна. Це означає, що вітродвигун регулюється з метою забезпечення постійного числа обертів при необхідній потужності, незалежно від швидкості вітру.

#### Висновок до першого розділу

Існує кілька технологічних схем ефективного отримання електричної енергії за рахунок енергії вітру для автономної, мережевої та комбінованої схеми ВЕУ. Можлива генерація як для змінного струму так і постійного з відповідними типами електрогенераторів та іншими елементами вітроелектричної системи.

У зв'язку з нестабільністю вітрового потоку та для узгодження електрогенерації ВЕУ з навантаженням необхідно застосовувати регулювання потужності.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

### 2.1 Вибір конфігурації та основних параметрів ВЕУ

У межах цього дипломного проєкту розробляється персональна вітроенергетична установка, призначена для встановлення на дахах приватних будинків. Вона орієнтована на часткове або повне енергозабезпечення побутових споживачів у стандартних кліматичних умовах України.

Головна ідея — створити компактну, доступну та ефективну альтернативу централізованому електропостачанню. Така установка може бути особливо корисною в умовах нестабільного живлення, віддалених населених пунктів або з метою зниження витрат на електроенергію.

Розроблювана ВЕУ має бути максимально безпечною, легкою в обслуговуванні та адаптованою до реальних умов побутового використання. Особлива увага приділяється малій вазі конструкції, низькому рівню шуму, а також простоті монтажу без залучення підйомної техніки.

У сучасній побутовій вітроенергетиці широко застосовуються як горизонтальні, так і вертикальні турбіни. Обидва типи мають свої особливості, що впливають на ефективність та зручність експлуатації.

У деяких випадках вертикальна конструкція виконана тоді, коли простір обмежений або має високий рівень турбулентності. Але за відкритого простору, навіть на даху, горизонтальна осьова турбіна має значну вищу ефективність і кращу стабільність роботи при середніх швидкостях вітру. З огляду на це, а також враховуючи бажання отримати максимальний енергетичний вихід з мінімальної площі, було прийнято рішення використовувати класичну трилопатеву горизонтальну турбіну.

Особливістю цієї конструкції є зміна складної орієнтації системи: для побутових умов передбачено використання простого хвостовика, який автоматично

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

повертає установку в сторону вітру. Це знижує загальну вартість системи, зменшує ймовірність відмов і покращує технічне обслуговування.

Вибір номінальної потужності установки є ключовим етапом у процесі проектування. Після типового споживання електроенергії в приватних домогосподарствах було вибрано параметри потужності 2-3 кВт. Така установка не потребує складної погоджувальної документації, легко інтегрується в існуючу електромережу будинку і здатна реально покрити 40–80% середньодобового споживання енергії, або працювати як резервне джерело живлення.

Також враховувались такі чинники:

- географічна прив'язка — для регіонів із середньою швидкістю вітру 5–6 м/с;
- конструкційні обмеження — дахова установка повинна мати масу не більше 100 кг;
- простота обслуговування — конструкція має бути обслуговуваною без демонтажу;
- тривалість безпечної роботи — механічні елементи розраховані на  $\geq 15$  років експлуатації;
- вартість виготовлення та монтажу — обмежена рамками споживчого бюджету.

Усі ці вимоги були враховані під час вибору конфігурації установок, яку в загальному вигляді подано в таблиці 2.1.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Таблиця 2.1 — Основні параметри проектованої ВЕУ

Параметр	Значення
Тип установки	Горизонтальна осьова, 3 лопаті
Номинальна потужність	2-3 кВт
Діаметр ротора	4,2 м
Висота встановлення над дахом	3,5 м
Швидкість старту	2,5-3 м/с
Номинальна швидкість вітру	8-10 м/с
Максимальна швидкість (відключення)	14-15 м/с
Генератор	Синхронний на постійних магнітах (ПМГ)
Напруга генератора	48 В (DC), з інвертором на 230 В
Система зберігання	АКБ LiFePO <sub>4</sub> 5–10 кВт·год
Керування	Мікроконтролер + сенсори
Гондола	Компактна, обтічна, з доступом до вузлів

Запропонована конфігурація поєднує в собі практичність, надійність та економічність, що є критично важливим у контексті застосування вітроенергетичних технологій у побуті. Це — системний, зважений інженерний вибір, що базується не на копіюванні існуючих моделей, а на адаптації принципів великої енергетики до умов приватного користувача.

## 2.2 Проектування роторної системи

Одним із найважливіших вузлів будь-якої вітроустановки є роторна система, оскільки саме вона взаємодіє з енергією вітру та перетворює її на обертальний момент. У нашій конструкції ця система включає три основні компоненти: лопаті, втулку, та головний вал.

Лопать є першим елементом, що сприймає навантаження від вітру. Вона має бути:

- достатньо міцною, щоб витримувати вітрові навантаження та відцентрові сили;
- максимально легкою, щоб не створювати надлишкових вібрацій;
- аеродинамічно ефективною — з профілем, що забезпечує високе співвідношення підйомної сили до опору.

Для нашої малої побутової установки було прийнято рішення використовувати три лопаті довжиною 2,1 м кожна (загальний діаметр 4,2 м). Така конфігурація дозволяє зберегти баланс між плавністю обертання, стійкістю до турбулентних потоків і простотою виготовлення.

Матеріалом лопаті обрано композит на основі скловолокна (GFRP) — це легкий, дешевий і технологічний варіант, що широко застосовується у серійному виробництві малої вітроенергетики. Всередині лопаті центральне ребро жорсткості, а також порожнина для зниження маси. Зовнішній шар покритий захисним гелевим покриттям, стійким до ультрафіолету та дощу.

Лопать спроектована з поступовим переходом профілю вздовж довжини:

- біля кореня — товстіший профіль типу NASA 4415 (висока підйомна сила, міцність);
- ближче до кінчика — тонший симетричний профіль NASA 0012, щоб зменшити опір і шум.

Ширина лопаті (хорда) зменшується від 180 мм до 80 мм. Кут атаки поступово знижується від 14° біля кореня до 4–6° на кінці. Такий підхід дозволяє підт-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

римувати рівномірний розподіл навантаження по довжині та зменшує пікові вібрації.

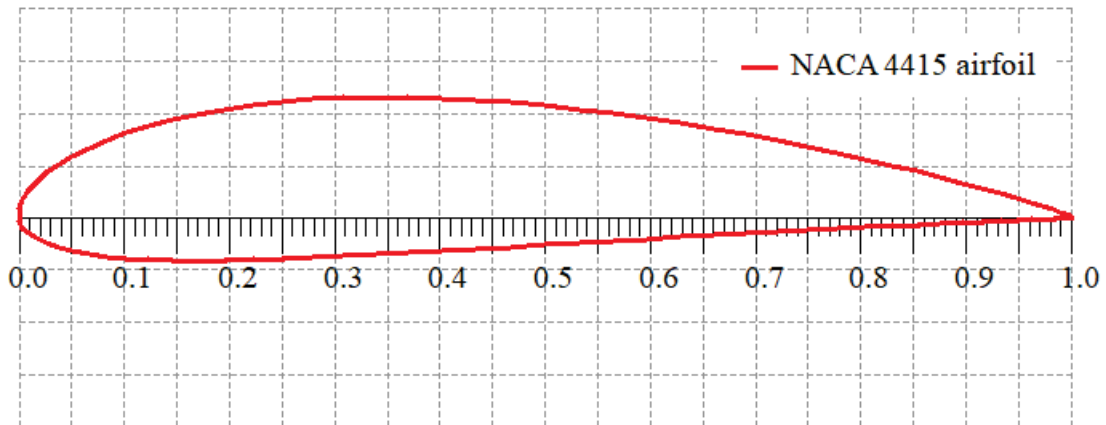


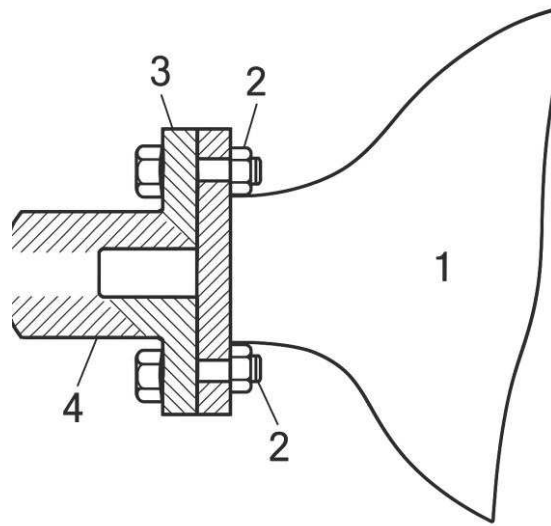
Рисунок 2.1 - Профіль аеродинамічного крила типу NACA 4415

Після виготовлення всі лопаті проходять динамічне балансування на верстаті або вручну — за допомогою шаблону та вантажів. Невелике асиметричне навантаження може створити значну вібрацію на обертах вище 300 об/хв, тому балансування є критично важливим.

Лопаті монтуються на втулку за допомогою болтового фланцевого з'єднання з металевими вставками у композиті. Це забезпечує надійне кріплення без розтріскування.

Кріплення лопатей до втулки створюють через вставні хвостовики з фіксаційними болтами, які проходять наскрізь через корпус втулки та вставляють в основу лопаті. Такий конструктивно простий варіант, що забезпечує надійну фіксацію при певному невеликому моменті завантаження, характерному для малої ВЕУ. Монтаж та демонтаж лопатей можливий без спеціального інструменту.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



1 — лопать; 2 — болт з гайкою та шайбою; 3 — фланець втулки; 4 — корпус втулки (з'єднаний з валом)

Рисунок 2.2 - Кріплення лопаті до втулки (вигляд в розрізі)

У результаті, обрана конструкція лопатей забезпечує високу ефективність перетворення енергії вітру, низький рівень шуму, та є придатною для серійного виробництва або індивідуального виготовлення з мінімальними витратами.

Таблиця 2.2 — Конфігурація лопаті

Критерій	Обраний підхід	Обґрунтування
Кількість лопатей	3	Оптимальний баланс ефективності й стабільності
Довжина	2,1 м	Достатня площа при збереженні компактності
Профіль	NACA 4415 → NACA 0012	Висока аеродинамічна якість
Матеріал	Склопластик (GFRP)	Легкий, міцний, недорогий
Кут атаки	змінний	Оптимізований розподіл навантаження

Втулка є важливим з'єднувальним елементом між обертовими лопатями та валом приводу. Вона одночасно виконує роль механічного вузла, що передає крутний момент, та опорної платформи, на якій закріплені лопаті.

У проєктованій установці втулка виконана у вигляді масивного циліндричного тіла з трьома кріпильними фланцями, розміщеними під кутом  $120^\circ$ . Така симетрична схема забезпечує рівномірний розподіл навантаження і мінімізує дисбаланс під час обертання.

Матеріалом для втулки обрано алюмінієвий сплав (наприклад, АК12 або 6061-Т6). Він має достатню міцність, стійкий до корозії і значно легший за сталь, що важливо для зменшення моменту інерції.

Кількість болтів на кожен лопать — 3 і більше, в залежності від товщини основи та конструкції фланця. У дипломному варіанті зображено типовий приклад болтами через фланець.

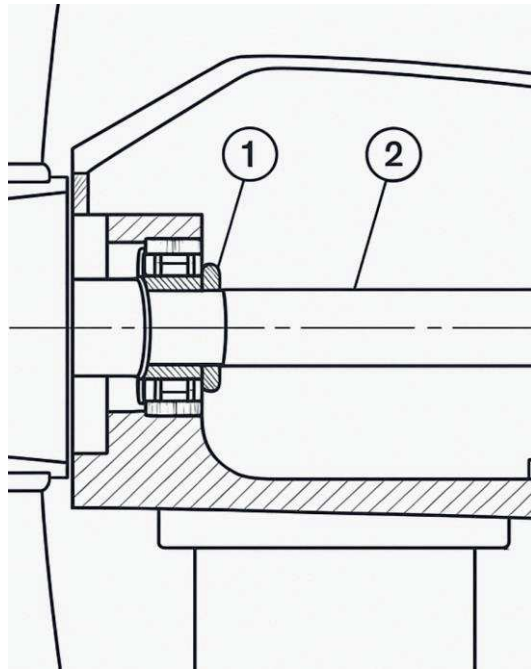
Головний вал передає обертальний момент від втулки з лопатями до генератора. У малопотужних установках допускається використання короткого жорсткого вала, з'єданого або напряму з генератором, або через проставку чи фланець.

У нашій конструкції використано прямий вал з нержавіючої сталі (марка 40Х або AISI 304), що забезпечує:

- високу стійкість до вигину і скручування;
- корозійну стійкість, з огляду на зовнішнє розташування;
- можливість точної обробки під посадкові місця.

Вал обертається у двох підшипниках кочення (типу 6205ZZ або аналог), розміщених у корпусі гондоли. Підшипники закритого типу — з мастилом, не потребують обслуговування. Для захисту від пилу та дощу встановлено ущільнювачі типу манжет (сальники).

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



1 — підшипниковий вузол (підшипник та посадочне гніздо); 2 — головний обертовий вал ротора

Рисунок 2.3 - Розміщення головного вала в корпусі гондоли (вигляд в розрізі)

Обертання від валу передається на генератор за допомогою:

- або гнучкої муфти (якщо потрібна компенсація невеликого осьового зміщення),
- або жорсткого фланцевого з'єднання (якщо співвісність ідеальна).

У проєкті передбачено застосування еластичної муфти типу HRC або Lovejoy, яка:

- знижує вібрації;
- спрощує монтаж;
- не потребує високої точності центрування.

Після збирання роторної частини проводиться балансування вала з втулкою та лопатями. Це необхідно для уникнення вібрацій, підвищеного зносу підшипників і втрати ефективності. Балансування виконується на стенді або за допомогою пробного запуску з вимірюванням коливань і добором вантажів.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

## 2.3 Механічна передача та електрогенератор

Один із ключових етапів у роботі будь-якої вітроустановки — це перетворення енергії вітру на електричну. Для цього механічне обертання, яке виникає від дії вітру на лопаті, передається на генератор. Від способу передачі моменту та типу генератора напряму залежить ефективність, довговічність і надійність всієї системи.

У нашій конструкції, виходячи з обраного діапазону потужності (до 5 кВт), від редуктора було свідомо відмовлено. Використовується безредукторна передача з гнучкою муфтою, що напряму з'єднує вал ротора і генератор.

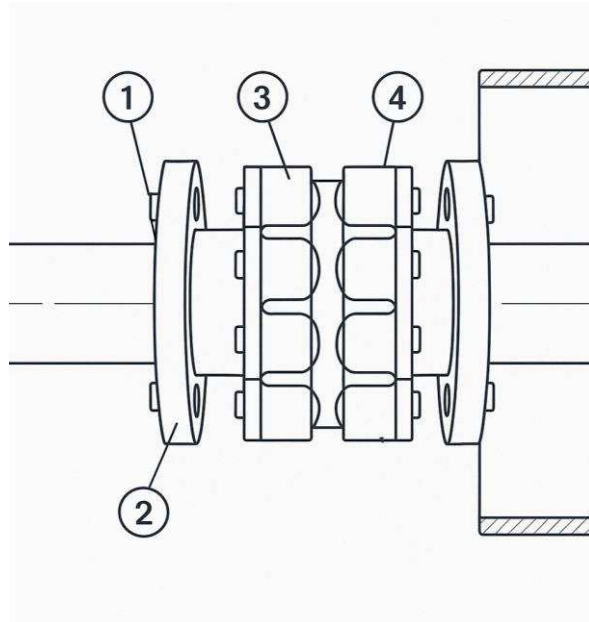
Редуктори, хоч і дозволяють підвищити швидкість обертання генератора при низьких обертах ротора, мають серйозні недоліки:

- складність конструкції,
- необхідність регулярного змащування,
- додатковий шум,
- втрати енергії (до 10–15% у механічному приводі).

Для малої установки на даху, де пріоритет — простота та надійність, безредукторна передача з гнучкою муфтою — найкращий вибір.

Муфта виконує ще одну важливу роль: гасить короткочасні ривки обертання, які можуть виникати при поривчастому вітрі. Це суттєво знижує механічне навантаження на вал і підшипники, продовжуючи термін служби системи.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



1 — вал; 2 — фланець напівмуфти; 3 — еластична вставка; 4 — напівмуфта з боку генератора

Рисунок 2.4 - Схема передачі моменту від валу до генератора через гнучку муфту

Серед типів генераторів, які використовуються у вітроенергетиці, найпоширеніші:

- асинхронні (індукційні),
- синхронні з електромагнітним збудженням,
- синхронні на постійних магнітах (ПМГ).

У нашому випадку найкращим варіантом є ПМГ (Permanent Magnet Generator). Основна його перевага — він не потребує зовнішнього живлення для збудження, оскільки магнітне поле створюється за рахунок постійних магнітів. Це не лише зменшує енергоспоживання, а й спрощує схему живлення та керування.

Також варто відзначити, що ПМГ має:

- вищий ККД при малих обертах,
- стабільну роботу у широкому діапазоні швидкостей,
- нижчий рівень шуму порівняно з асинхронними машинами.

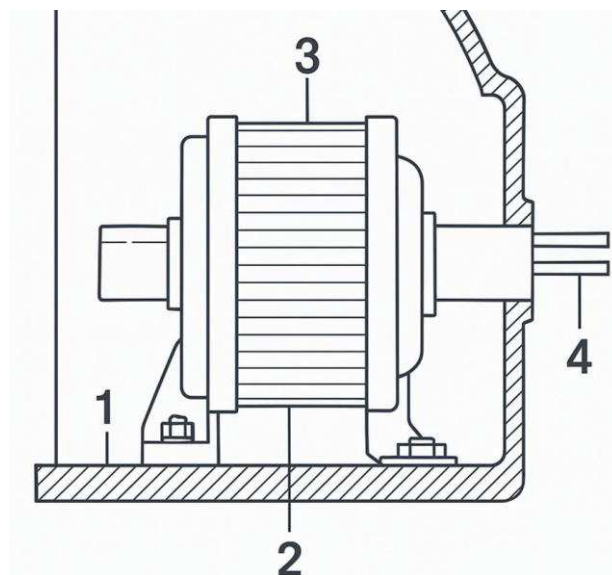
З урахуванням невисоких обортів (до 400 об/хв) і потреби у напрузі 48 В по-

стійного струму, генератор виготовлений з високоефективних неодимових магнітів, розташованих на роторі. Статор містить кільцеву обмотку з багатожильного проводу з лакоізоляцією.

Неодимові магніти — це найпотужніші постійні магніти, які використовуються в техніці, зокрема в електрогенераторах, динамо-машинах, сервомоторах, жорстких дисках, навушниках і, звісно, вітроустановках.

Такі генератори широко використовуються у серійних турбінах китайського, корейського, польського та американського виробництва. Більшість з них мають герметичний корпус з пасивним охолодженням. Це дає змогу уникати перегріву навіть за тривалої безперервної роботи.

Генератор монтується на жорстку алюмінієву платформу всередині гондоли, і фіксується через демпферні прокладки. Це рішення дозволяє зменшити передавання вібрацій на корпус і знижує шум. Болти кріплення розташовані по осях симетрії, що полегшує юстування при монтажі.



1 — корпус гондоли; 2 — монтажна опора; 3 — генератор з ребристим охолодженням; 4 — кабельний вихід

Рисунок 2.5 - Генератор у корпусі гондоли

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
37

Гнучка муфта з'єднує вал генератора з головним валом установки, забезпечуючи передачу моменту без перекосів і ривків. З'єднання закрите кожухом для захисту від пилу і вологи.

Генератор підключений до контролера заряду, який має вбудовану MPPT-функцію — відстеження точки максимальної потужності. Це дозволяє автоматично регулювати навантаження на генератор і підтримувати оптимальний ККД навіть при зміні швидкості вітру.

Далі енергія надходить у акумуляторну батарею LiFePO<sub>4</sub> (літій-залізофосфатну). У разі перевищення порогу заряду система переключає живлення на інвертор або активує резистивне гальмо, щоб уникнути пошкодження обладнання.

Застосування сучасного генератора з постійними магнітами та прямої безредукторної передачі повністю виправдане з точки зору ефективності, вартості та надійності. Такий підхід дозволяє створити енергоефективну, просту в експлуатації установку, яка ідеально підходить для приватного сектора та побутового застосування.

#### 2.4 Гондола, система орієнтації та гальмування

Гондола — це не лише корпус, що захищає механізми, а й інтегрована платформа, яка включає вузли повороту, орієнтації на вітер, передачі моменту й гальмування. Вона фактично є опорною рамою, на якій монтуються всі ключові компоненти установки, і саме від її конструкції залежить робоча стійкість, ремонтпридатність та безпека експлуатації. Її конструкція повинна забезпечувати мінімальну вагу, стійкість до вібрацій, жорсткість і легкість доступу до внутрішніх компонентів. Окрім цього, гондола повинна бути достатньо герметичною, аби захистити електрообладнання від вологи та пилу. У малогабаритних установках, таких як ця, ключове — простота, надійність і самодостатність вузлів, що дозволяє уникати складних сервісних операцій і підтримувати працездатність установки в автономному режимі.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

У вітроустановках застосовуються два основні типи yaw-систем (систем орієнтації на вітер), вони зображені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Класифікація систем орієнтації в вітроенергетичних установках

Тип	Принцип дії	Переваги	Недоліки
Пасивна (хвостовик)	Вітер тисне на “плавник”, повертає гондолу	Надійна, без електроніки, працює сама	Може “бовтатися” при турбулентному потоці
Активна (моторизована )	Електропривід повертає гондолу за даними сенсора	Висока точність орієнтації	Складна, дорога, потребує живлення та обслуговування

У нашій ВЕУ реалізована пасивна система з хвостовиком. Її особливості:

- хвіст має жорстке кріплення до корпусу гондоли;
- геометрія підібрана так, щоб створити достатній момент повороту навіть при помірному вітрі (4–5 м/с);
- кут розміщення хвоста  $\sim 100\text{--}110^\circ$  відносно осі ротора (оптимальний для стабільної орієнтації).

Система не реагує на короточасні зміни поривів — це плюс, бо зменшує деренчання та знос поворотного вузла.

Поворот гондоли відносно основи здійснюється навколо вертикальної осі (yaw-axis). У малих установках зазвичай використовують:

- вісь з трубчастого профілю  $\text{Ø}25\text{--}35$  мм;
- підшипник ковзання (втулка з поліаміду, бронзи або латуні);
- роликівий поворотний вузол з кульками (рідше, дорожчий).

В нашому проєкті застосовано простий підшипник ковзання з фіксацією гондоли від осьового зсуву шайбами та притискними пластинами. Це дає:

- мінімальний опір повороту;
- простоту виготовлення;

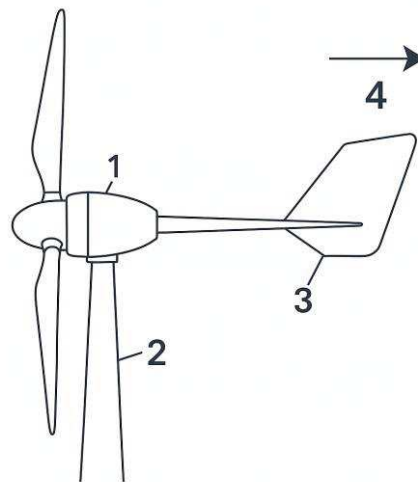
- можливість обслуговування без зняття гондоли.

Однак при сильному вітрі або тривалому коливанні може виникнути розбвтування вузла, тому конструкцію треба доповнити обмежувачами кута повороту (упорами) — не дає гондолі обертатись на  $360^\circ$  і пошкодити кабель.

На відміну від великомасштабних вітроустановок, у яких використовуються складні гідравлічні або дискові гальмівні системи, в малопотужних побутових ВЕУ пріоритетом є прості, надійні та автономні методи обмеження обертання. Головне завдання такої системи — запобігти небезпечному розкручуванню ротора при надмірно сильному вітрі (наприклад, понад 13–14 м/с), коли установка не встигає ефективно перетворювати механічну енергію на електричну або коли накопичувачі енергії вже заповнені.

У запропонованій конструкції реалізовано поєднання двох гальмівних принципів — аеродинамічного та електронного. Це дає змогу створити систему, яка працює без участі користувача та не потребує складних сервісних операцій.

Аеродинамічне гальмування працює за рахунок повороту всієї гондоли з ротором під кутом до напрямку вітру. Це досягається шляхом зміщення центра тиску хвостовика відносно осі повороту. У нормальних умовах такий хвостовик тримає установку чітко по вітру.



1 — гондола; 2 — башта; 3 — хвостовик

Рисунок 2.6 - Орієнтація вітроустановки за вітром за допомогою хвостовика

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
40

Однак при сильному пориві аеродинамічне навантаження на ротор збільшується, і момент сили, створений на хвості, перевищує стабілізуючий — гондолу повертає вбік. Це знижує кут атаки лопатей і відповідно — зменшує швидкість обертання. Така система не потребує електроніки, не боїться збоїв живлення і працює природним чином, поки існує сам вітер.

Повністю розраховувати лише на аеродинаміку — ненадійно, особливо у випадку, коли енергія все ще продовжує надходити до повністю зарядженої акумуляторної батареї. Саме тому передбачено другий рівень захисту — електронне (резистивне) гальмування. Воно реалізується через контролер, який постійно вимірює параметри виходу з генератора. Якщо напруга перевищує певний поріг, або якщо батарея заряджена повністю, контролер автоматично підключає до виходу генератора резистивне навантаження — зазвичай у вигляді металевих спіралей або ТЕНів. Уся надлишкова енергія перетворюється на тепло, і при цьому генератор починає “відчувати опір”, який, у свою чергу, гальмує обертання ротора.

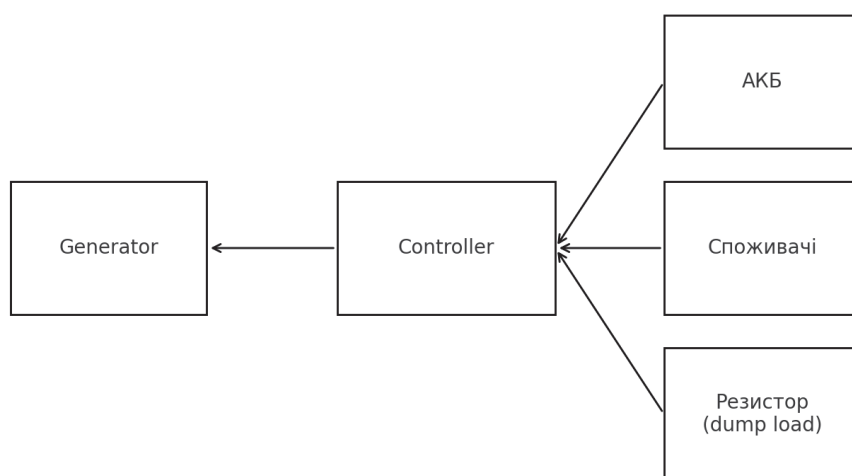


Рисунок 2.7 — Логіка розподілу електроенергії в вітроустановці

Таке рішення ефективне, оскільки дозволяє не лише обмежити швидкість, але й захищає акумулятори від перезаряду, що особливо важливо для літєвих батарей. Крім того, воно добре масштабується: за потреби можна паралельно підк-

лючати додаткові резистори, змінюючи поріг гальмування.

Загалом система гальмування в установці є надійною, дубльованою та повністю автономною, що відповідає всім критеріям безпеки для побутового використання.

У нашому випадку гондола є жорстким коробчастим металевим каркасом, обшитим знімними панелями з оцинкованої сталі або алюмінію. Така конструкція дозволяє:

- зменшити загальну масу;
- зручно компоувати внутрішні вузли;
- забезпечити швидкий доступ для обслуговування генератора, муфти або клем.

Габарити гондоли визначені насамперед розмірами внутрішніх компонентів:

1. Генератор на 2,5 кВт має типові розміри: довжина ~300–350 мм; діаметр ~250–280 мм.
2. Вал ротора з підшипниковим вузлом потребує ~250 мм монтажної довжини;
3. Муфта або адаптер для передачі моменту — ще ~100–150 мм;
4. Запас простору на кабелі, вентиляцію та кріплення — 200 мм.

Сумарно, внутрішній простір корпусу має забезпечувати не менше ніж 900–1000 мм вільної довжини, а також відповідні допуски по ширині та висоті для розміщення електроніки (за потреби).

Наша вітроустановка розрахована на роботу в діапазоні вітрових швидкостей від 3 до 14 м/с. При швидкості вітру 3 м/с ротор починає обертання, а номінальну потужність 2,0 кВт установка досягає при 8 м/с. При швидкості понад 13–14 м/с активується система обмеження: гондола частково повертається хвостовиком до потоку, а контролер скидає надлишкову енергію на навантаження. Це дозволяє захистити генератор і АКБ без застосування складної автоматики.

Таблиця 2.3 - Підсумкові габарити гондоли

Параметр	Значення
Зовнішня довжина	900 мм
Ширина корпусу	350 мм
Висота	400 мм
Маса (без лопатей)	~30–45 кг
Матеріал каркасу	Сталь S235/S355 або алюміній (при зменшенні ваги)
Обшивка	Металеві панелі, оцинковані або фарбовані
Кріплення генератора	Жорстке фланцеве, з боку внутрішньої пластини
Кріплення валу	Підшипникова опора на основній балці рами
Вихід кабелю	Знизу гондоли

## 2.5 Проектування башти та фундаменту

Опора вітроустановки — це критично важливий елемент, який повинен забезпечувати не лише механічну стійкість, а й точне положення ротора в зоні найбільш ефективної швидкості вітру, а також ізолювати коливання й вібрації від будівельних конструкцій. У побутових дахових установках замість класичної щогли використовується жорстка коротка опора, яка кріпиться безпосередньо до перекриття будівлі. Це дозволяє зменшити витрати, уникнути громіздких розтяжок та забезпечити простоту технічного обслуговування.

Башта вітроустановки слугує опорою для гондоли та ротора, виводячи їх у зону більш стійких повітряних потоків.

Вона повинна забезпечувати:

- висоту установки для досягнення номінальної потужності;
- стійкість до вітрових навантажень (включно з поривами до 25 м/с);

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

- мінімальні коливання та вібрації;
- довговічність та можливість демонтажу гондоли для обслуговування.

Корпус гондоли виконаний у вигляді жорсткої прямокутної конструкції, з обшивкою з листового алюмінію. Така компоновка дозволяє досягти малої ваги, захисту від корозії та простоти складання. Бічні панелі гондоли знімні, що забезпечує легкий доступ до внутрішніх вузлів для обслуговування. Генератор встановлюється на жорстку платформу зі гумового листа товщиною 5 мм, яка амортизує вібрації та витримує осьове навантаження від обертання. Вал ротора закріплюється на двох підшипниках радіального типу зі ступенем пилозахисту, розрахованих на ресурс понад 30 000 годин без обслуговування.

Таблиця 2.4 - Конструкція та матеріали гондоли

Елемент	Матеріал	Особливості
Несучий каркас	Алюмінієвий профіль	Легкий, стійкий до корозії
Обшивка корпусу	Листовий алюміній 1,5 мм або оцинкована сталь	Знімна, кріплення на гвинтах
Платформа під генератор	5 мм	Точна установка генератора, гасіння вібрацій
Підшипники валу	Радіальні, закриті, двосторонні	Пилозахищені, ресурс $\geq 30\ 000$ год
Хвостовик	Алюмінієвий або сталевий лист 2–3 мм	Розрахований на створення поворотного моменту при вітрі $> 12$ м/с
Захист	Ущільнювачі, вентиляційні отвори	Герметизація класу IP54

Загальна довжина корпусу гондоли становить 900 мм, ширина — 350 мм, а висота — 400 мм. У середині цього об'єму розміщується генератор довжиною до 300 мм і діаметром до 260 мм, гнучка муфта, вал і простір для технічного обслуговування. Така компоновка дозволяє зберегти низький центр мас і зменшити навантаження на вузол обертання. Повна маса гондоли без лопатей становить приблизно 35–40 кг. У зборі з втулкою й трьома лопатями довжиною по 2,1 м кожна, загальна маса верхньої частини системи досягає 60 кг, що є прийнятним для кріплення до жорсткої опори з трубою діаметром 200 мм. Розрахунки які підтверджують вибір можна знайти і наступному розділі.

У гондолі також передбачено можливість встановлення датчиків температури генератора, напруги на виході, а також індикатора вібрації або навантаження. Герметизація корпусу забезпечується ущільнювачами, а вентиляційні отвори закриті пилозахисними сітками, що відповідає класу захисту IP54.

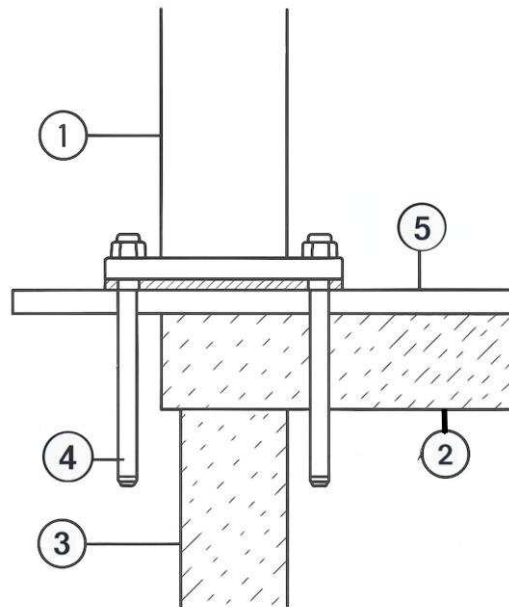
Таким чином, конструкція гондоли є простою у виробництві, достатньо жорсткою, ремонтпридатною, має високий ресурс і дозволяє реалізувати всі функції, необхідні для автономної малопотужної вітроустановки потужністю до 2 кВт.

Обраний тип опори — це жорстка сталева труба, яка проходить через дах і закріплюється до несучої частини будівлі. Вона виконує функцію не лише несучої конструкції, а й каналу для прокладання електричного кабелю від генератора. Одночасно труба повинна бути достатньо жорсткою, щоб витримувати момент навантаження від гондоли та вітру, не допускаючи значного прогину або вібрацій.

З урахуванням маси верхньої частини ( $\approx 60$  кг) та вітрового моменту при поривах швидкістю до 25 м/с, було прийнято рішення використати трубу зовнішнім діаметром 200 мм і товщиною стінки 10 мм. Це забезпечує жорсткість на згин і кручення з п'ятикратним запасом міцності. Висота труби становить 3,5 метра, що дозволяє досягти потрібної висоти установки з урахуванням нахилу покрівлі. Верхній кінець башти обладнаний фланцем діаметром 260 мм, який фіксує гондолу на болтах, а нижня частина труби зварена до опорної монтажної рами або анкерної пластини.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата





1 - стійка (труба башти); 2 - несуче перекриття даху; 3 — опорна колона або стіна;  
4 - анкер; 5 - сталева опорна платформа

Рисунок 2.8 - Схема встановлення труби башти

Розрахункове згинальне навантаження, що діє на башту в результаті вітрового тиску на ротор та маси гондоли, становить приблизно 1,5–2,0 кН·м. З урахуванням динамічного характеру навантажень і можливих поривів вітру до 25–27 м/с, для нашої конструкції було прийнято доцільне рішення використати трубу зовнішнім діаметром 200 мм і товщиною стінки 10 мм.

Обрана труба має значно більший модуль опору порівняно з варіантами меншого перерізу, а отже — спроможна сприймати вигинальні моменти понад 7 кН·м, що у кілька разів перевищує фактичні робочі навантаження. Це дозволяє не лише мінімізувати прогин вершини труби, але й забезпечити високу стійкість конструкції до вібрацій та багаторазових змін навантаження упродовж усього строку експлуатації.

Оціночний прогин верхнього торця опори при максимальному розрахунковому моменті становить менше 2 мм, що значно менше за допустимі значення для таких конструкцій ( $L/200$ ). Таким чином, конструкція з трубою  $\varnothing 200$  мм з тов-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

тою стінкою не лише гарантує надійність у вітрових умовах, а й створює значний інженерний запас міцності на випадок поривів, дисбалансу ротора або тривалої роботи у несприятливих погодних умовах.

Всі ключові розрахунки навантажень, згинальних моментів, прогину й стійкості будуть детально подані у наступному розділі, присвяченому інженерним перевіткам працездатності та надійності вітроустановки.

## 2.6 Система автоматичного керування та електропостачання

Електрична частина вітроенергетичної установки є ключовою ланкою, що забезпечує передачу, регулювання, накопичення та перетворення енергії, яку виробляє генератор. У малопотужних автономних системах, зокрема таких, як розроблена ВЕУ на 2 кВт, пріоритет надається простоті, енергонезалежності та надійності роботи без складної автоматики.

Генератор, розташований у гондолі, виробляє змінний струм низької напруги (3-фазний АС), який безпосередньо надходить до випрямляча, що перетворює енергію в постійний струм для заряджання акумуляторів. Випрямляч ізольовано змонтовано в корпусі поруч із контролером. Після випрямлення енергія подається на МРРТ-контролер (або аналог, пристосований до вітрових навантажень), який постійно відстежує вихідну напругу та струм із генератора, оптимізуючи точку роботи та одночасно виконуючи функції захисту та гальмування.

У нормальних умовах напруга після контролера надходить на групу акумуляторних батарей (типово 48 В, 200–300 А·год), які працюють як буфер — накопичують енергію для подальшого споживання. При повному заряді акумуляторів контролер автоматично підключає резистивне навантаження (гальмівний блок), яке відводить надлишок енергії у вигляді тепла, тим самим сповільнюючи ротор. Для живлення стандартного побутового або дачного навантаження постійна напруга з АКБ подається на інвертор, який перетворює її на 220 В змінного струму, частотою 50 Гц. Залежно від класу інвертора передбачається автоматичне перемикачання на мережу у разі просідання батарей або перенавантаження.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Навантаження (споживач) вмикається паралельно до АКБ через інвертор, а в разі перевантаження — контролер переключає всю генерацію на гальмівний блок, або частково обмежує струм на вході. Таким чином, вся система може функціонувати як повністю автономно, так і в режимі підтримки мережі або резервного джерела живлення.

У розробленій системі вузол контролю та захисту виконує функції моніторингу параметрів, реагування на відхилення та реалізації алгоритмів безпечної роботи вітроустановки. Він є вбудованою частиною контролера заряду, але містить окремі апаратні й програмні компоненти, що працюють автономно від загального інверторного кола.

Основна логіка роботи реалізується за допомогою мікроконтролера, або попередньо сконфігурованої логіки в комерційному вітровому контролері.

Контрольовані параметри:

- Напруга генератора (вхідна) - вимірюється після випрямляча — аналоговим датчиком (наприклад, модуль на ACS712 або подібний). Ціль — визначити, чи не перевищено допустимий рівень на вході контролера ( $> 60$  В для системи 48 В).
- Струм генератора (зарядний струм) - датчик струму (шунт або Hall-датчик) встановлюється між випрямлячем і АКБ. Забезпечує захист у разі перевантаження або пробією муфти / генератора.
- Напруга на акумуляторній батареї - безпосередній моніторинг для визначення рівня заряду. При перевищенні порогу (наприклад, 57 В для 48-вольтової системи) система перемикає енергію на гальмівне навантаження.
- Температура гальмівного резистора - показує, чи не перегрівається силовий резистор при тривалому розсіюванні. Реалізується простим термодатчиком типу DS18B20 або аналоговим.
- Датчик обертів (опційно) - датчик Холла на роторі або генераторі дозволяє оцінити частоту обертання — і в разі перевищення ліміту активувати екстрене гальмування.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Таким чином, вузол контролю реалізує повний замкнутий цикл моніторингу від генерації — до навантаження, з усіма ключовими точками контролю.

Усі сигнали знімаються з точок в реальному часі, обробляються в контролері, і викликають відповідні дії: гальмування, роз'єднання, перемикання, аварійне відключення. Це забезпечує не тільки стабільність роботи системи, а й безпечні умови експлуатації вітроустановки у побутовому середовищі.

#### Висновок до другого розділу

У даному розділі було виконано проектування основних конструктивних і електричних вузлів автономної вітроенергетичної установки потужністю до 2 кВт, призначеної для монтажу на даху житлового або комерційного об'єкта. В основу розробки покладено принцип максимальної енергоефективності, технологічної простоти, ремонтпридатності та реальної можливості виготовлення в умовах малого виробництва.

Опрацьовано та обґрунтовано вибір трилопатевого горизонтального ротора діаметром 4,2 м, що дозволяє ефективно перетворювати енергію вітру при середніх швидкостях 6–8 м/с. Було розраховано та сформовано конструкцію гондоли — несучого блоку, в якому розміщуються генератор з прямим приводом, роторний вал, муфта, хвостовик для орієнтації та інші системи. Габарити та конфігурація гондоли відповідають масі генератора та забезпечують зручний доступ до обслуговування.

Виконано вибір труби башти з урахуванням усіх вітрових та інерційних навантажень. Розроблено конструкцію платформи для кріплення на даху, що дозволяє встановити ВЕУ без заливки бетонного фундаменту, з урахуванням рівномірного розподілу навантажень на несучі конструкції будівлі.

Окрему увагу приділено електричній частині. Описано принцип роботи та компонування системи. Особливо акцентовано на вузлі керування й захисту, який дозволяє не лише ефективно заряджати АКБ, але й забезпечує безпеку роботи

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

шляхом автоматичного гальмування генератора у разі перезаряду або аварійного стану.

Таким чином, у межах цього розділу було реалізовано інженерну розробку вітроустановки малої потужності — з урахуванням реальних умов експлуатації, технічних та економічних обмежень. Всі прийняті технічні рішення обґрунтовані з точки зору надійності, ефективності та доцільності. У наступному розділі буде проведено розрахункову перевірку працездатності системи за основними параметрами: потужність, навантаження, механічна міцність і енергетична ефективність.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВЕУ

#### 3.1 Розрахунок енергетичних характеристик установки

Процес генерації електроенергії у вітроенергетичній установці починається з перетворення кінетичної енергії потоку повітря на обертовий момент ротора. Розрахунок енергетичних характеристик дозволяє оцінити теоретичну потужність установки, врахувати ефективність кожного етапу передачі енергії та визначити реальні можливості генерації при заданих умовах вітру. Процес генерації електроенергії у вітроенергетичній установці починається з перетворення кінетичної енергії потоку повітря на обертовий момент ротора. Розрахунок енергетичних характеристик дозволяє оцінити теоретичну потужність установки, врахувати ефективність кожного етапу передачі енергії та визначити реальні можливості генерації при заданих умовах вітру.

Розрахунок починається з визначення площі, через яку проходить вітер:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.1)$$

Де:

- $D = 4.2$  м — діаметр ротора;
- $A$  - ефективна проща вітрового потоку.

$$A = \frac{3,1416 \cdot (4,2)^2}{4} \approx 13,85 \text{ м}^2 \quad (3.2)$$

Потужність вітрового потоку визначається за формулою:

$$P_{\text{вітру}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (3.3)$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Де:

- $\rho = 1,1225 \text{ кг/м}^3$  - густина повітря при  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  та нормальному тиску
- $v$  = швидкість вітру, м/с

При номінальній швидкості вітру  $v = 8 \text{ м/с}$ , ми маємо:

$$P_{\text{вітру}} = 0,5 \cdot 1,1225 \cdot 13,85 \cdot 512 \approx 4365 \text{ Вт} \quad (3.4)$$

Це — максимальна кінетична енергія вітру, яка проходить через площу ротора. Згідно з законом Беца, жодна турбіна не може перетворити більше ніж 59.3% цієї енергії:

$$P_{\text{макс.мех}} = 4365 \cdot 0,593 \approx 2589 \text{ Вт} \quad (3.5)$$

На практиці ця величина також зменшується через низку конструктивних і експлуатаційних факторів, зокрема:

- аеродинамічні втрати на профілі лопатей;
- турбулентність потоку у міських умовах;
- механічні втрати в підшипниках і з'єднаннях;
- недосконалу орієнтацію ротора відносно напрямку вітру.

Однак точно оцінити ці втрати складно, особливо для прототипної моделі. Тому в подальших розрахунках для простоти приймається, що реальна потужність на валу ротора дорівнює граничній механічній потужності за Бецом, тобто 2589 Вт. Це дозволяє визначити верхню межу електричної потужності, яка може бути отримана після генерації.

У нашій конструкції застосовується генератор з постійними неодимовими магнітами, який не потребує збудження й має високий ККД. Орієнтовно 0.88.

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}} = 2589 \cdot 0,88 \approx 2278 \text{ Вт} \quad (3.6)$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Це значення відповідає максимальній (піковій) електричній потужності, яку може видати установка при сприятливих вітрових умовах.

Оскільки потужність вітру пропорційна кубу швидкості, продуктивність суттєво залежить навіть від незначних змін у швидкості повітряного потоку.

Таблиця 3.1 - Оцінка продуктивності при різних швидкостях вітру

Швидкість вітру (м/с)	Потужність вітру (Вт)	Потужність на валу (Вт)	Потужність генератора (Вт)
3	≈ 123	≈ 73	≈ 64
5	≈ 479	≈ 284	≈ 250
6	≈ 828	≈ 491	≈ 432
8	4365	2589	2278
10	≈ 8570	> 5000	≈ 4472, обмежується контролером
12	≈ 14260	> 8500	Захисне електронне гальмування

Враховуючи діаметр ротора 4.2 м і номінальну швидкість вітру 8 м/с, установка має теоретичну межу корисної механічної потужності близько 2.6 кВт, із можливістю отримати до 2.3 кВт електричної енергії при оптимальній роботі генератора. Це відповідає поставленим цілям проекту — створення малої побутової вітроустановки на 2 кВт із гнучкими умовами експлуатації.

### 3.2 Механічне навантаження та перевірка несучих елементів

Правильна оцінка навантажень дозволяє перевірити працездатність конструкції в умовах вітрового навантаження, обертання й інерційної дії. Особливо це важливо для опори лопатей, вала, гондоли та башти, оскільки саме ці елементи сприймають основні навантаження від ротора.

Для оцінки навантаження, яке чинить вітер на лопаті, використовується класична формула лобового опору:

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (3.7)$$

Де:

- $C_d$  - коефіцієнт лобового опору (для лопатей орієнтовно 1,2 — 1,3, залежно від профілю);
- $\rho$  - густина повітря;
- $v = 12$  м/с - максимальна робоча швидкість перед активацією захисту;
- $A$  — площа обертання ротора.

$$F = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 1,215 \cdot 13,85 \cdot 12^2 = 0,735 \cdot 13,85 \cdot 144 \approx 1464 \text{Н} \quad (3.8)$$

Це — сумарна горизонтальна сила, з якою вітер тисне на всю площу ротора при граничних умовах (до активації гальмування).

Далі визначимо крутний момент на валу. Потужність, що передається на вал, пов'язана з моментом і кутовою швидкістю:

$$P = M \cdot \omega \Rightarrow M = \frac{P}{\omega} \quad (3.9)$$

Кутова швидкість обертання ротора:

$$n = 180 \text{об/хв} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 180}{60} = 18,85 \text{рад/с} \quad (3.10)$$

Використовуємо потужність на валу 2589 Вт, тоді:

$$M_{вал} = \frac{2589}{18,85} \approx 137,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.11)$$

Це основне робоче навантаження, яке передається через вал від ротора до генератора.

Сумарне згинальне навантаження гондоли на точку кріплення до башти можна визначити як:

$$M_{гонд} = M_{вал} + M_{розг.ваг.} \approx 400 - 450 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.12)$$

З урахуванням запасу, на етапі проектування краще прийняти:  
 $M_{гонд} = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

Після визначення зусилля, яке забезпечується у роторі, гондолі та валу, необхідно оцінити, чи здатна опорна конструкція (труба та платформа фундаменту) надійно передавати ці навантаження, забезпечуючи стійкість та безпечну експлуатацію вітроустановки.

Основне навантаження на трубу створює вітрова сила, прикладена на висоті гондоли:

$$M_{вітр} = F_{вітру} \cdot h = 1460 \cdot 3,5 = 5110 \text{ Н} \quad (3.13)$$

Сумарне згинальне навантаження на основу труби:

$$M_{загальний} = M_{вітр} + M_{гонд} = 5110 + 500 = 5610 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.14)$$

Далі порахуємо міцність труби використовуючи момент опору круглого профілю для згину:

$$W = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D} \quad (3.15)$$

Зовнішній діаметр  $D = 200$  мм = 0,2 м, товщина стінки становить 10 мм. Труба має круглий порожнистий поперечник, тому внутрішній діаметр  $d$  визначається відніманням подвоєної товщини стінки (ліва і права стінка) від зовнішнього діаметра:

$$d = 200\text{мм} - 2 \cdot 10\text{мм} = 180\text{мм} = 1,8\text{м} \quad (3.16)$$

Обчислимо момент опору круглого профілю:

$$W = \frac{\pi(0,0016 - 0,00105)}{6,4} = \frac{0,00173}{64} = 0,00027\text{м}^2 \quad (3.17)$$

Максимальне згинальне напруження:

$$\sigma = \frac{M_{\text{заг}}}{W} = \frac{5610}{0,00027} \approx 20,8 \cdot 10^6 = 20\text{МПа} \quad (3.18)$$

Це в десятки разів менше, ніж допустиме для сталі S355 (240–260 МПа), тобто запас по міцності понад 10 разів.

Труба має висоту 3,5 м, а діаметр — 0,2 м. Труба не буде нестійкою на вигин, особливо з урахуванням її товщини в 10 мм. Також при згинанні вершина труби матиме прогин менше 4–5 мм, що допускається без додаткового розрахунку (при  $h \leq 5$  м і жорсткій фіксації).

Розрахунки показали, що при використанні труби 200×10 мм із сталі S355, з висотою 3,5 м, вона здатна витримати сумарне згинальне навантаження понад 5,6 кН·м з великим запасом.

Максимальні напруження в стінці труби не перевищують 9–10% від допус-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

тимих, а прогин — у межах допустимих норм. Конструкція фундаментної платформи забезпечує жорстке фіксування без потреби у глибокому бетонному фундаменті — достатньо монтажу до бетонного даху або перекриття через анкери.

### 3.3 Динамічні характеристики: момент інерції ротора

Момент інерції — це аналог маси в обертовому русі. Він показує, наскільки «важко» об'єкту почати або припинити обертання.

Для систем із кількома компонентами (наприклад, лопаті + втулка) момент інерції рахується як сума моментів інерції кожного елемента.

Момент інерції ротора:

$$J_{\text{лоп}} = \frac{1}{3} \cdot mL^2 \quad (3.19)$$

Три лопаті маса кожної якої приблизно становить 4 кг, з довжиною 2,1 м. Порахуємо момент інерції для однієї лопаті:

$$J_1 = \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot (2,1)^2 \approx 5,88 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.20)$$

Для трьох лопатей:

$$J_{\text{лопатеї}} = 3 \cdot 5,88 \approx 17,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.21)$$

Додамо приблизну масу втулки:

$$J_{\text{втул}} = mr^2 \approx 6 \cdot 0,2^2 \approx 0,24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.22)$$

Підсумковий момент інерції ротора:

$$J_{\text{рот}} = J_{\text{лоп}} + J_{\text{втул}} = 17,6 + 0,24 = 17,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.23)$$

Отримане значення моменту інерції ротора є типовим для малої вітроустановки з діаметром ротора до 4,5 м. Воно безпосередньо впливає на динаміку запуску та стабільність обертання:

Плавне уповільнення при падінні вітру — ротор довше обертається "на інерції", що дозволяє генератору підтримувати напругу на короткий час навіть після спаду потоку.

Запуск установки можливий вже з  $\sim 3$  м/с — завдяки легким лопатям та оптимізованій масі втулки. Значення моменту інерції не є надмірним і не заважає старту.

Співвідношення маси до довжини лопатей (4 кг на 2.1 м) забезпечує баланс між інерційністю та реактивністю установки.

Таким чином, конструкція ротора є збалансованою з точки зору динаміки: забезпечується і старт з помірного вітру, і робота без ривків при поривах. Це особливо важливо в умовах мінливого вітру, характерного для дахових установок.

#### Висновок до третього розділу

У цьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність спроектованої вітроустановки потужністю 2-3 кВт. Проведено оцінку енергетичного потенціалу, визначено аеродинамічні навантаження, згинальні моменти, міцність конструкції опори та інерційні характеристики ротора.

Результати показали, що всі елементи установки — від лопатей і вала до труби та фундаменту — мають необхідний запас міцності, стійкість до вітрових навантажень та відповідають умовам безпечної роботи.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту було розроблено проєкт ма-  
логабаритної вітроенергетичної установки потужністю 2-3 кВт, адаптовану для  
встановлення на дах приватного або промислового будівлі. На основі аналізу іс-  
нуючих типів ВЕУ було визначено, що саме горизонтально-осьова конфігурація  
з трьома лопатями є найбільш ефективною для даних умов експлуатації.

У процесі проєктування було обґрунтовано вибір усіх основних вузлів: ло-  
патеї, генератора, валу, гондоли, систем гальмування та орієнтації, кост-  
рукційно виконано рішення для башти та фундаментного кріплення. Система ке-  
рування передбачає як автоматичне, так і резервне гальмування, контроль заряду  
акумуляторів, а також захист від перевантажень і коротких замикань.

Розрахунки, проведені в технічній частині, підтвердили працездатність  
конструкції:

- при номінальній швидкості вітру 8 м/с установка генерує до 2 кВт потужності;
- старт обертання можливий з 3 м/с;
- при вітрі понад 12–14 м/с передбачено активне гальмування.

Всі елементи конструкції мають достатній запас міцності та відповідають вимо-  
гам експлуатації в умовах змінних вітрових навантажень.

Отже, запропонована конструкція є технічно та економічно обґрунтова-  
ною, може використовуватись для часткового енергозабезпечення приватних бу-  
дівель, зменшуючи залежність від централізованих мереж та сприяючи впрова-  
дженню відновлюваної енергетики на побутовому рівні.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



12. Український гідрометеорологічний центр – середні швидкості вітру по регіонах України.

13. IRENA – Wind Energy Report 2023 – International Renewable Energy Agency [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.irena.org/publications>

14. European Wind Energy Association (EWEA) – Technical reports and publications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://windeurope.org>

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		