

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

на тему:

«Розробка автономної вітроенергетичної установки селища Власівка
Кіровоградської області»

Виконав: студент 3 курсу,
групи НВДЕ-2023-1у
спеціальності 141 – *Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела
енергії)*



Р. І. Джафаров

Керівник



Т. М. Пугачова

Рецензент



Я. Б. Форкун

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АЕЕ



канд.техн.наук., доцент **Олексій ЄГОРОВ**

“ ____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Джафарову Рауфу Ілгаровичу

1. Тема проєкту: «Розробка автономної вітроенергетичної установки селища Власівка Кіровоградської області»

керівник проєкту Пугачова Тетяна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент
затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05.2026 року
№ 440-03.

2. Строк подання студентом проєкту 15 червня 2026 року.

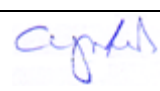
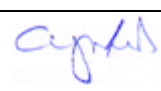
3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Номінальна потужність, Мінімальна швидкість вітру, номінальна швидкість вітру. Швидкості вітру за шкалою Бофорта. Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вітроенергетичний потенціал. Вітроенергетичні установки і методика визначення їхніх характеристик. Розрахунок роботи автономної вітроенергетичної установки. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
1) Схеми типів вітрогенераторів . 2) Схеми проходження вітрового потоку через турбіну, що вільно обтикається. 3) Схеми лопаті вітроколеса 4) Схеми

вітроустановки з вертикальною віссю обертання. 5) 3-d креслення вітроустановки з горизонтальною віссю обертання

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Пугачова Т.М., доцент каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доцент каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 11 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Енергія вітру та потенціал її використання	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Вітроенергетичні вітроустановки та їх конструкція	31.05.2026-05.06. 2026	
3	Розрахунок ефективності застосування вітроенергетичної установки.	07.06.2026-10.06. 2026	
4	Розробка заходів з охорони праці.	03.06.2026-07.06. 2026	
5	Оформлення пояснювальної записки	08.06.2026-12.06. 2026	
6	Підготовка та подання дипломного проєкту до захисту.	11.06. 2026-14.06. 2026	

Студент



Джафаров Р. І.

Керівник роботи



Пугачова Т.М.

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота складається з розрахунково-пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 58 аркушах формату А4, яка вміщує 4 розділи, 10 таблиць, 12 рис., перелік посилань 24 і 9 листів презентаційної частини.

Мета – вивчення ефективності використання вітрової електростанції для забезпечення електроенергією селища.

Об'єктом дослідження є вітроенергетична установка, що використовується для отримання електричної енергії з метою покриття електричного навантаження споживачів селища. Мета роботи полягає в дослідженні ефективності застосування вітроенергетичної установки для забезпечення електричною енергією селища.

Головними завданнями роботи є: аналіз сучасного стану використання та конструкцій вітроенергетичних установок різних типів; визначення річної сумарної електричної потужності для споживачів котельної; виконання оцінки вітрового потенціалу місцевості; вибір вітроагрегату та розрахунок основних параметрів його роботи; визначення доцільності застосування вітроагрегату для покриття навантаження електричних споживачів в селищі.

Розглянуто питання охорони праці.

Ключові слова: котельня, вітроенергетична установка, електричний струм, навантаження, ефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ВІТРУ.....	9
1.1 Характеристика вітру як природного атмосферного явища	10
1.2 Основні характеристики вітру	16
1.3 Аналіз потенціалу вітрової енергії	21
1.4 Вплив вітрового режиму на генерацію електричної енергії	26
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК І МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК	30
2.1 Етапи розвитку та сучасний стан світової вітроенергетики	30
2.2 Конструктивні різновиди вітроенергетичних установок	40
2.3 Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки	44
2.4. Вертикально-осьові вітроенергетичні установки (VAWT).....	56
3. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ	65
3.1 Вихідні данні	65
3.2 Визначення параметрів вітрового режиму	66
3.3 Оцінка обсягів виробництва електричної енергії вітроенергетичною установкою	69
3.4 Обґрунтування вибору елементів автономної системи електропостачання	73
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	77
4.1. Загальна характеристика об'єкта, що проектується	77
4.2 Промислова санітарія	78
4.2.1 Метеорологічні умови	78
4.2.2 Виробниче освітлення	79
4.2.3 Шум і вібрація	80
4.3 Заходи безпеки	81
4.4 Протипожежна безпека	82

4.5 Захист навколишнього середовища	83
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Пошук альтернативних видів енергії є одним із ключових завдань сучасної енергетики в розвинених державах світу. Природні ресурси, що містяться в надрах планети та активно використовуються як паливо, поступово вичерпуються. Економічне зростання промисловості та належний рівень життя населення значною мірою залежать від відкриття й освоєння нових відновлюваних джерел енергії.

Однією з ключових причин прискореного розвитку відновлюваної енергетики в багатьох країнах світу, незалежно від їхньої територіальної площі, географічного розташування, рівня економічного розвитку та забезпеченості традиційними енергетичними ресурсами, є суттєві екологічні переваги відновлюваних джерел енергії. Важливу роль також відіграє постійне вдосконалення технологій, спрямованих на підвищення екологічної безпеки енергетичних установок на базі відновлювальних джерел енергії. Додатковою перевагою таких технологій є практична відсутність викидів парникових газів у процесі виробництва енергії, що сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та боротьбі зі зміною клімату.

Одним із таких перспективних природних ресурсів є вітер. Відповідно, важливим соціально-економічним напрямом діяльності людини, спрямованим на виробництво електроенергії за допомогою сили вітру, виступає вітроенергетика.

Вітер є екологічно чистим, невичерпним і загальнодоступним джерелом відновлюваної енергії. У сучасних умовах вітроенергетичні установки широко використовуються для перетворення кінетичної енергії повітряних потоків в електричну енергію. Щороку кількість встановлених вітрових електростанцій у світі непинно зростає, що свідчить про підвищення ролі вітроенергетики в глобальному енергетичному секторі. Згідно з даними Глобальної ради з вітроенергетики, наприкінці 2014 року сумарна встановлена потужність вітроенергетичних установок у світі перевищила 360 ГВт. Провідні позиції за обсягами введених потужностей займали Китай, Сполучені Штати Америки та

Німеччина. Водночас активно розвивається морська вітроенергетика, на частку якої припадає значна кількість офшорних вітроелектростанцій. Подальше вдосконалення технологій та зменшення вартості обладнання сприяють зростанню попиту на такі енергетичні об'єкти та розширенню сфер їх застосування.

Використання вітроенергетики для виробництва електроенергії сьогодні є поширеною практикою в технологічно розвинених країнах світу. Повітряні маси мають певний запас кінетичної енергії, який перетворюється на електричну енергію за допомогою вітрових турбін. Чим більші лопаті установки та площа захоплення повітряного потоку, тим вищими є її потужність і коефіцієнт корисної дії.

Головною перевагою такого обладнання є невичерпність ресурсу, адже вітер існуватиме на планеті доти, доки світитиме Сонце. Повітряні потоки утворюються внаслідок нерівномірного нагрівання земної поверхні сонячними променями, що спричиняє різницю атмосферного тиску. У результаті повітря переміщується з областей високого тиску в напрямку зон із нижчим тиском.

1. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ВІТРУ

Останніми роками сфера відновлюваної енергетики в Україні активно розвивається та демонструє стабільне зростання. Основними чинниками такого розвитку є світова тенденція до зменшення викидів парникових газів, а також прагнення держави підвищити рівень енергетичної незалежності. У результаті цього відбувається поступове збільшення загальної встановленої потужності об'єктів відновлюваної енергетики, яка на сьогодні становить приблизно 1500 МВт.

Серед усіх напрямів відновлюваної енергетики вітроенергетика є однією з найбільш динамічних галузей, що активно розвиваються в Україні. Її принцип роботи полягає у перетворенні енергії вітру на електричну енергію за допомогою спеціальних вітроенергетичних установок. Використання сили вітру має багатовікову історію: ще в давні часи люди застосовували вітряні механізми, зокрема млини, для виконання різноманітних господарських завдань.

У світовому енергетичному секторі відновлювані джерела енергії поступово займають дедалі важливіше місце. Їх активне впровадження в різних країнах світу пояснюється низкою переваг, серед яких екологічна безпечність, зменшення викидів парникових газів та постійне вдосконалення технологій, що сприяє підвищенню надійності й ефективності енергетичних систем.

В Україні важливу роль у розвитку вітроенергетики відіграє «зелений» тариф — механізм підтримки державою, який забезпечує гарантований викуп електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел. Завдяки цьому галузь стає більш привабливою для інвесторів і отримує додаткові можливості для розвитку.

Одним із головних напрямів подальшого розвитку вітроенергетики є будівництво нових вітроелектричних станцій, особливо в регіонах із високим вітровим потенціалом, зокрема на півдні України. Результативність роботи таких станцій значною мірою залежить від характеристик вітру, тому

дослідження вітрових ресурсів є важливим етапом як під час проєктування об'єктів, так і в процесі їх подальшої експлуатації.

Таким чином, наведені фактори свідчать про важливу роль вітроенергетики у розвитку енергетичного сектору України. Завдяки значному потенціалу, екологічним перевагам та державній підтримці вона залишається одним із пріоритетних напрямів модернізації національної енергосистеми та зміцнення енергетичної безпеки країни.

Отже, сукупність розглянутих чинників підтверджує важливе значення вітроенергетики для України та визначає її як один із пріоритетних напрямів розвитку сучасної енергетичної системи держави.

1.1 Характеристика вітру як природного атмосферного явища

Вітер — це рух великих мас газу. На Землі вітер представляє собою рух повітряних потоків переважно в горизонтальному напрямку. В атмосферах інших планет вітер також утворюється внаслідок руху газових мас, однак його склад визначається особливостями атмосфери конкретної планети. Сатурн та Нептун мають максимальніші швидкості вітру в Сонячній системі.

У космічному просторі існує так званий сонячний вітер — безперервний потік заряджених частинок, що випромінюються Сонцем. Крім того, розрізняють планетарний вітер, який являє собою процес поступового виходу газів з атмосфери планети в космічний простір, що з часом призводить до зменшення її газової оболонки.

Вітри мають різні класифікації, за різними характеристиками, зокрема за масштабом поширення, швидкістю, причинами виникнення, географічними особливостями та впливом на навколишнє середовище.

У метеорології основними критеріями класифікації вітру є його швидкість, тривалість і напрямок руху. Короткочасні та різкі збільшення швидкості повітряного потоку називають поривами вітру. Якщо ж сильний

вітер триває від кількох секунд до приблизно однієї хвилини, таке явище називають шквалом.

Тривалі атмосферні потоки поділяють залежно від швидкості вітру та характеру прояву. До них належать урагани, бурі, бризи, шторми, тайфуни. Тривалість дії вітру може бути різною. Наприклад, вітри, що супроводжують грозою, зазвичай тривають лише декілька хвилин. Бризи, які виникають через різницю температур між сушею та водоймами, змінюють свій напрямок приблизно кожні дванадцять годин.

Більш масштабними атмосферними процесами є мусони — сезонні вітри, що формуються внаслідок нерівномірного нагрівання суші та океану і можуть держатися до 5 місяців. Окрему групу становлять пасати — постійні вітри, які виникають через різницю атмосферного тиску між екваторіальними та тропічними районами Землі під впливом сили Коріоліса. Вони дмуть упродовж усього року та відіграють важливу роль у глобальній циркуляції атмосфери.

Вітри здавна впливали на розвиток людської цивілізації. Вони надихали на створення міфів і легенд, визначали перебіг історичних подій, сприяли розширенню торгівлі, культурного обміну та воєнних походів. Енергія повітряних потоків використовувалася для приведення в дію різноманітних механізмів, а згодом — для виробництва електроенергії та організації дозвілля.

Завдяки вітрильним суднам людство вперше отримало можливість перетинати океани. Повітряні кулі, що рухалися під впливом повітряних течій, відкрили епоху повітроплавання. Сучасні літаки також враховують силу й напрямок вітру для збільшення підйомної сили та зменшення витрат пального.

Водночас вітер може становити серйозну небезпеку. Зони різкої зміни швидкості та напрямку повітряних потоків здатні спричинити втрату керування літаком. Потужні вітри та хвилі, які вони утворюють на великих водоймах, нерідко руйнують гідротехнічні й прибережні споруди. Крім того, сильні повітряні потоки можуть сприяти швидкому поширенню пожеж.

Вітри відіграють важливу роль у формуванні рельєфу, спричиняючи утворення специфічних еолових форм поверхні. Вони зумовлюють нагромадження ґрунтотворних порід, зокрема лесу, а також викликають ерозію гірських порід і ґрунтів. Крім того, повітряні потоки здатні переносити пил із пустель на значні відстані.

Вітер сприяє розповсюдженню насіння рослин і полегшує пересування літаючих тварин, що забезпечує освоєння нових територій різними видами. Атмосферні явища, пов'язані з рухом повітряних мас, по-різному впливають на живі організми та природні екосистеми.

Виникнення вітру пов'язане з різницею атмосферного тиску, яка виникає внаслідок нерівномірного нагрівання земної поверхні. Найбільше сонячної енергії отримують екваторіальні райони, де суша і водні поверхні нагріваються значно сильніше, ніж в інших частинах Землі. Це призводить до нагрівання повітря, зміни його густини та формування повітряних потоків. Нагріте екваторіальне повітря піднімається у верхні шари атмосфери та переміщується у напрямку полюсів, утворюючи область пониженого атмосферного тиску. Одночасно холодніше й щільніше повітря рухається поблизу земної поверхні до екватора, заміщуючи теплі повітряні маси. У результаті цього формується область підвищеного атмосферного тиску та відбувається безперервна циркуляція повітря в атмосфері.

Вітри виникають унаслідок переміщення повітряних мас із областей високого атмосферного тиску до областей низького тиску. Межа між такими повітряними масами називається атмосферним фронтом. Взаємодія різних атмосферних фронтів формує переважаючі вітри — стійкі повітряні потоки, які протягом тривалого часу дмуть в одному напрямку над певною територією. Області, де сходяться такі потоки, називають зонами конвергенції.

Напрямок переважаючих вітрів визначається не лише різницею атмосферного тиску, а й обертанням Землі. Під впливом сили Коріоліса повітряні потоки відхиляються від прямолінійного руху, що зумовлює переважання напрямків із заходу на схід або зі сходу на захід. Унаслідок цього

циклони та інші великомасштабні атмосферні системи обертаються проти годинникової стрілки в Північній півкулі та за годинниковою стрілкою в Південній півкулі.

Під впливом сили Коріоліса частина повітряних потоків переміщується вздовж меж між областями високого та низького атмосферного тиску. Такі вітри називають геострофічними. У середині XIX століття нідерландський метеоролог Христофер Бейс-Баллот сформулював закон, який описує їхній напрямок: якщо в Північній півкулі стати спиною до вітру, область низького тиску буде розташована ліворуч, а в Південній півкулі — праворуч.

У глобальній циркуляції атмосфери виділяють кілька основних вітрових поясів, серед яких полярні східні вітри, західні вітри, пасати, зони кінських широт і області штилю. Кожен із них формується під впливом особливостей розподілу атмосферного тиску та температури на поверхні Землі.

Полярні східні вітри являють собою холодні та сухі повітряні потоки, які переважно дмуть зі сходу. Вони утворюються в районах полярних максимумів — областей високого атмосферного тиску поблизу Північного та Південного полюсів — і спрямовуються до субполярних зон низького тиску. Ці вітри є важливою складовою загальної циркуляції атмосфери та впливають на кліматичні умови високих широт.

Західні вітри — це стійкі повітряні потоки, які переважають у середніх широтах і переміщуються із заходу на схід. Вони формуються внаслідок різниці атмосферного тиску між субтропічними областями високого тиску та субполярними зонами низького тиску.

Інтенсивність західних вітрів змінюється залежно від пори року. У зимовий період, коли атмосферний тиск у полярних районах знижується, різниця тиску між повітряними масами зростає, що призводить до посилення цих вітрів. Улітку, навпаки, полярні області високого тиску стають більш стійкими, тому західні вітри слабшають, а їхній вплив частково замінюється полярними східними вітрами.

Кінські широти являють собою області субтропічного високого тиску, розташовані приблизно між 32° і 37° північної та південної широти. Для цих районів характерні теплий і сухий клімат, незначна кількість опадів та слабка вітрова активність. Саме в межах кінських широт розташовано багато найбільших пустель світу, зокрема Атакаму в Південній Америці та Калахарі в Африці.

Через переважання областей високого атмосферного тиску повітряні потоки тут зазвичай мають невелику швидкість. Сильні вітри спостерігаються досить рідко і, як правило, мають короткочасний характер. Такі кліматичні особливості значною мірою визначають природні умови та ландшафти цих територій.

Пасати — це постійні та досить потужні вітри, які переважають у тропічних широтах і дмуть переважно зі сходу на захід. Вони характеризуються стабільністю напрямку та швидкості, тому з давніх часів мали велике значення для мореплавства, торгівлі та географічних відкриттів.

У минулому мореплавці активно використовували пасати для прокладання швидких і безпечних маршрутів через Атлантичний і Тихий океани. Завдяки цим вітрам стало можливим налагодження регулярного морського сполучення між віддаленими частинами світу. І сьогодні пасати відіграють важливу роль у судноплаванні, оскільки впливають на формування океанічних течій та особливості навігації в тропічних районах Світового океану.

Континентальні пасати, які формуються над суходолом, зазвичай характеризуються вищою температурою та меншою вологістю порівняно з морськими пасатами, що виникають над океанами. Взаємодія повітряних мас різного походження може суттєво впливати на місцеві кліматичні особливості, визначаючи характер погодних умов у певному регіоні.

Місце, де сходяться пасати Північної та Південної півкуль, називають зоною міжтропічної конвергенції. Навколо неї розташована зона штилів, де вітри зазвичай дуже слабкі, а погода часто буває спокійною та маловітряною.

Штиль виникає через сильне нагрівання земної поверхні поблизу екватора. Тепле повітря піднімається вгору, через що біля поверхні формується область низького тиску. Після підйому повітряні маси переміщуються в бік тропіків, де поступово охолоджуються і знову опускаються донизу. Саме так утворюється постійний кругообіг повітря між екватором і тропічними широтами, який відіграє важливу роль у формуванні глобальної циркуляції атмосфери.

Люди використовують енергію вітру вже багато століть. У минулому вітер допомагав вітрильним суднам долати великі відстані морями й океанами, а також приводив у рух вітряні млини. За їхньою допомогою перекачували воду, мололи зерно, розпилювали деревину, виготовляли папір і подрібнювали руду.

Сьогодні значення вітрової енергії значно зросло. Основною сферою її використання є виробництво електроенергії. Сучасні вітроелектричні установки забезпечують електрикою житлові будинки, підприємства, лікарні, навчальні заклади та промислові об'єкти, сприяючи розвитку екологічно чистої енергетики.

Вітер є одним із найважливіших відновлюваних джерел енергії, використання якого не супроводжується прямими викидами шкідливих речовин у навколишнє середовище. Для перетворення енергії вітру на електроенергію застосовують вітрові турбіни. Вони являють собою високі вежі з двома або трьома лопатями, які нагадують пропелер. Під дією вітру лопаті починають обертатися, приводячи в рух генератор, що виробляє електричну енергію.

Зазвичай вітрові турбіни об'єднують у великі комплекси, які називають вітроелектростанціями. Їх розміщують у місцях зі стабільними та достатньо сильними вітрами — на узбережжях, гірських хребтах, відкритих рівнинах або в морських акваторіях. Таке розташування дає змогу максимально ефективно використовувати енергію повітряних потоків і забезпечувати стабільне виробництво електроенергії.

Попри численні переваги вітроенергетики, її розвиток супроводжується певними дискусіями. Частина людей вважає, що вітрові турбіни погіршують вигляд природних ландшафтів і створюють додатковий шум під час роботи. Також існують побоювання щодо їхнього впливу на птахів і кажанів. Водночас дослідження показують, що кількість тварин, які гинуть через роботу вітротурбін, є значно меншою порівняно з втратами від дорожнього транспорту, ліній електропередач та висотних споруд.

Протягом останніх десятиліть вітроенергетика демонструє стрімкі темпи розвитку. У 2010–2016 роках світові обсяги використання енергії вітру зросли більш ніж у чотири рази. Провідні позиції за кількістю встановлених вітроенергетичних установок посідають Німеччина, Іспанія, Сполучені Штати Америки, Індія та Данія. Водночас активне нарощування потужностей спостерігається у Франції та Китаї, де вітроенергетика стала одним із важливих напрямів розвитку відновлюваної енергетики.

За оцінками фахівців, за умови збереження нинішніх темпів розвитку вітроенергетики її роль у світовому енергетичному балансі й надалі зростатиме. Прогнозується, що до 2060 року близько третини світового споживання електроенергії може забезпечуватися за рахунок енергії вітру. Це свідчить про значний потенціал вітроенергетики як одного з ключових напрямів розвитку відновлюваної енергетики та переходу до більш екологічно безпечної енергетичної системи.

1.2 Основні характеристики вітру

Кожна держава світу має власні метеорологічні служби, діяльність яких координується Всесвітньою метеорологічною організацією, що розташована в Женеві. Метеорологічні служби здійснюють систематичну реєстрацію погодних даних, зокрема показників швидкості та напрямку вітру.

Водночас слід зазначити, що метеорологічні станції безперервного спостереження, навіть за наявності сучасного обладнання, фіксують переважно

загальні атмосферні параметри. Такої інформації недостатньо для обґрунтованого вибору оптимальної конструкції вітроенергетичної установки та прийняття відповідних технічних рішень. Це пов'язано з тим, що параметри вітру зазвичай вимірюють на висоті 15 м поблизу населених пунктів і аеропортів, де вплив повітряних потоків часто послаблюється через наявність природних або штучних перешкод.

Таким чином, наведені дані можуть використовуватися лише для попередньої оцінки вітроенергетичного потенціалу території. Для отримання достовірних результатів необхідно проводити тривалі вимірювання протягом року з урахуванням сезонних коливань швидкості та напрямку вітру. Крім того, дослідження мають охоплювати різні точки місцевості та виконуватися на кількох висотах, що дає змогу більш точно оцінити можливості використання вітрової енергії в конкретному регіоні.

Для оцінювання швидкості вітру метеорологічні служби широко використовують шкалу Бофорта, яка базується на спостереженні за впливом вітру на навколишнє середовище. Водночас точні значення швидкості визначаються за допомогою анемометрів. Зазвичай показники усереднюють за 15-хвилинний проміжок часу, а вимірювання проводять на стандартній висоті 15 м над поверхнею землі.

Однак для розрахунку технічних характеристик вітроенергетичних установок необхідно враховувати миттєві зміни (флуктуації) швидкості та напрямку вітру. Отримати такі дані в межах стандартних метеорологічних спостережень складно через обмежену частоту вимірювань (як правило, через визначені часові інтервали або рідше).

Існують спеціалізовані анемометри для безперервного вимірювання швидкості вітру, однак вони характеризуються певною інерційністю, що знижує точність фіксації короткочасних поривів і турбулентних коливань повітряного потоку.

Під час вибору місця встановлення вітроенергетичних установок у районах, де можливе аеродинамічне екранування з окремих напрямків, особливого значення набуває врахування напрямку повітряних потоків.

Напрямок вітру визначається відповідно до сторони горизонту, з якої він надходить.

Роза вітрів (рис. 1.1) є графічним відображенням повторюваності та середніх значень швидкості вітру за окремими напрямками або розподілу швидкісних характеристик для конкретного з них.

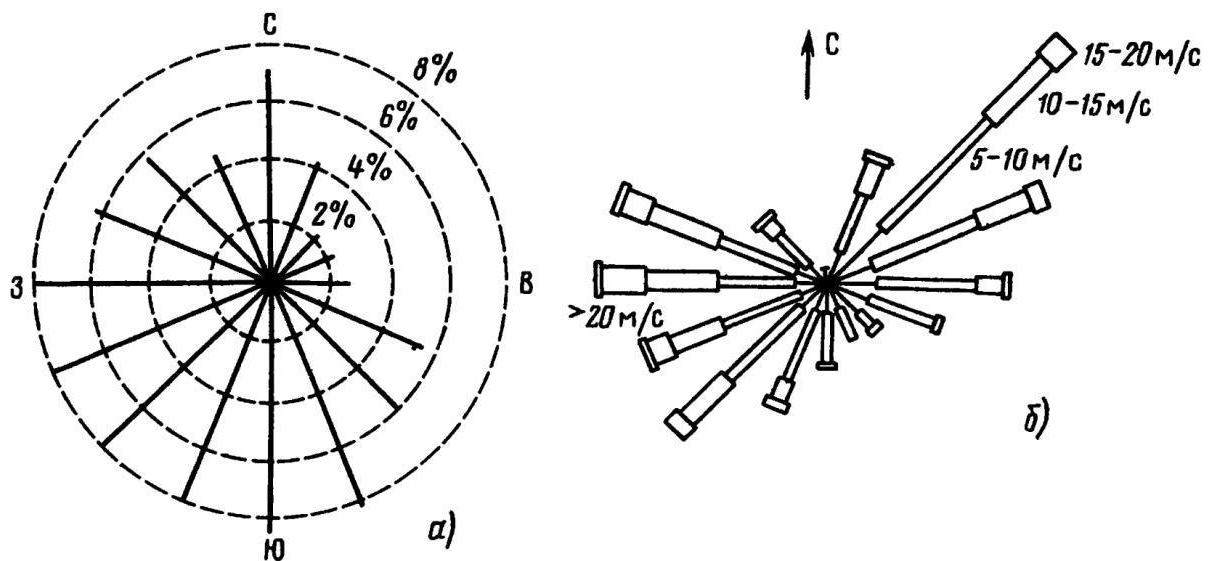


Рисунок 1.1. Роза вітрів.

- а — напрямок вітру. Кожна радіальна лінія характеризує частоту виникнення вітру відповідного напрямку за певний період часу..
- б — напрямок і сила вітру. Частота виникнення вітру певного швидкісного діапазону графічно представлена довжиною відповідного прямокутника..

На вітроколеса, розташовані на різних висотах, повітряний потік впливає по-різному, оскільки швидкість вітру змінюється з висотою. Згідно з умовою

прилипання, на межі взаємодії повітряного потоку із земною поверхнею його швидкість дорівнює нулю. Це пояснюється впливом сил в'язкості та тертя, які гальмують рух повітря в приповерхневому шарі атмосфери.

У приземному шарі атмосфери швидкість зростає зі збільшенням висоти до рівня розташування будівель, дерев та інших перешкод за складною нелінійною залежністю (рис. 1.2).

Вище зони впливу місцевих перешкод (шару шорсткості) зміна швидкості вітру з висотою описується більш впорядкованою закономірністю та може бути подана у вигляді відповідної аналітичної залежності

$$u = V \ln \left(\frac{z}{z_0} \right),$$

де d — на рівні, який є нижчим за висоту навколишніх перешкод; z_0 — співвідношення висоти перешкод і відстані ddd ; V — визначальна швидкість.

Отримані результати свідчать про те, що для забезпечення стабільної та ефективної роботи вітроколеса його необхідно розміщувати на висоті, достатньо більшій за висоту навколишніх перешкод. У такому разі повітряний потік, що надходить до вітроколеса, характеризуватиметься меншою турбулентністю, незначними коливаннями швидкості та напрямку, а також вищою однорідністю. Найсприятливішими для розміщення вітроенергетичних установок є відкриті підвищені ділянки місцевості, зокрема куполоподібні височини, оточені водними просторами або рівнинними полями, де вплив природних і штучних перешкод є мінімальним.

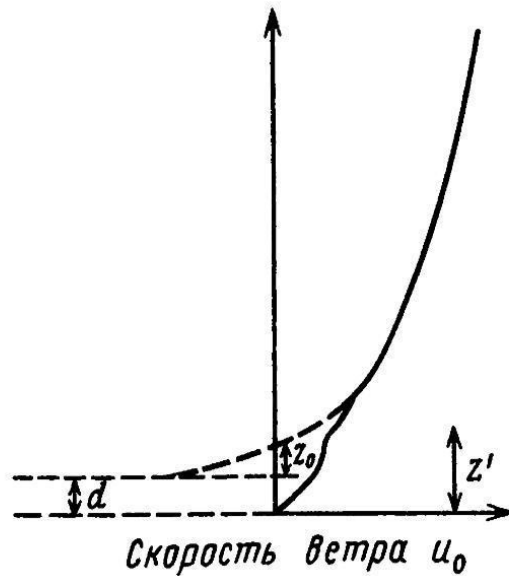


Рисунок 1.2. Вертикальний розподіл швидкості вітру в приземному шарі атмосфери. Z_0 - висота перешкод

Для визначення швидкості на висоті від 5 до 50 м користуються формулою

$$u_z = u_s (10^{\frac{z}{15}})^{b'}$$

де u_s — опорна швидкість вітру на висоті 15 м; $b'=0,15$.

Чим меншим є значення параметра b' ., тим меншими будуть навантаження на лопаті.

Параметри вітроенергетичної установки необхідно ретельно добирати з урахуванням конкретних метеорологічних умов місцевості. При цьому більш важливим показником є гарантована (номінальна або середньоексплуатаційна) потужність, яку установка здатна стабільно забезпечувати, ніж річний обсяг виробленої електроенергії.

За швидкості вітру близько 12 м/с вітроустановки можуть генерувати достатню або навіть надлишкову кількість електроенергії, що створює

можливість її акумулювання. Території із середньорічною швидкістю вітру менше 5,5 м/с зазвичай не рекомендуються для розміщення вітроенергетичних установок. Водночас регіони, де цей показник перевищує 8,5 м/с, вважаються перспективними для розвитку вітроенергетики.

Суттєві навантаження на конструктивні елементи вітроустановки спричиняють флуктуації повітряного потоку з частотою близько $0,1 \text{ с}^{-1}$. Для таких коливань характерна підвищена інтенсивність турбулентних пульсацій. Короткочасні пориви вітру також мають турбулентний характер і можуть викликати додаткові динамічні навантаження на ротор і башту установки.

1.3 Аналіз потенціалу вітрової енергії

Енергетичний потенціал вітру значною мірою визначається густиною повітря та швидкістю повітряного потоку. Густина повітря належить до основних параметрів, які використовуються під час розрахунку та побудови кривої потужності вітроенергетичних установок. Вона залежить від атмосферного тиску і температури навколишнього середовища та характеризується одиницею вимірювання кг/м^3 :

$$\rho = \rho_0 \frac{288B}{760T}$$

де ρ — фактична густина повітря в конкретних метеорологічних умовах; ρ_0 — стандартна густина сухого повітря, визначена для атмосферного тиску 760 мм рт. ст. і температури 288 К.

Під впливом місцевих перешкод і особливостей рельєфу швидкість вітру може істотно змінюватися в межах окремих ділянок території. Тому фактична швидкість вітру в певний момент часу не є сталою величиною. Миттєва швидкість вітру V розглядається як сума середньої швидкості V_m та змінної складової $v_{\text{пув}}$, яка характеризує короткочасні відхилення швидкості від її середнього значення:

$$V = V_m + v$$

Однією з характерних особливостей вітрового режиму є збільшення швидкості вітру з висотою. Для визначення швидкості повітряного потоку на різних висотах широко застосовується степеневий профіль, що встановлює функціональну залежність між швидкістю вітру та висотою над поверхнею землі:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha$$

де V_1 — швидкості вітру, виміряні відповідно на висотах h_1 та V_2 — коефіцієнт, що характеризує вплив шорсткості земної поверхні на вертикальний профіль швидкості вітру. Його значення зазвичай перебуває в діапазоні від 0,12 до 0,26.

Критерій Бетца є фундаментальним теоретичним обмеженням, яке застосовується до вітроенергетичних установок будь-якого типу. Він визначає максимальну частку енергії вітрового потоку, що може бути перетворена вітродвигуном на корисну механічну енергію. Відповідно до теорії, розробленої німецьким ученим Альбертом Бетцом, граничне значення коефіцієнта використання енергії вітру становить 0,592, або 59,2 %. На практиці сучасні промислові вітрогенератори досягають коефіцієнта потужності близько 0,4, що свідчить про високий рівень ефективності їх роботи.

Мінімальною робочою швидкістю вітру називають швидкість, за якої вітроагрегат починає обертатися, однак ще не виробляє корисної потужності. У цьому режимі установка працює на холостому ходу, а виробництво електроенергії практично відсутнє.

Максимально допустима робоча швидкість вітру визначає верхню межу швидкості повітряного потоку, за якої вітроагрегат може функціонувати без перевищення розрахункових механічних навантажень.

Циклонна швидкість вітру характеризує стійкість конструкції до екстремальних вітрових навантажень у неробочому стані.

Розрахункова швидкість вітру відповідає моменту досягнення номінальної потужності установки, а номінальна потужність є максимальною потужністю, на яку спроектовано вітроагрегат.

У вітроенергетичних розрахунках часто використовується двопараметрична функція розподілу швидкостей вітру, яка дозволяє описати ймовірнісні характеристики вітрового режиму та визначити тривалість дії вітру різної інтенсивності. Параметри цієї залежності змінюються залежно від особливостей місцевості, шорсткості поверхні та метеорологічних умов. Для опису розподілу швидкостей вітру найчастіше використовують двопараметричний розподіл Вейбулла, який дає змогу оцінити ймовірність виникнення вітру певної швидкості та тривалість його дії. Параметри розподілу визначаються особливостями вітрового режиму конкретної місцевості.

$$\Phi(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right]$$

Практичні дослідження показують, що наведена функція досить точно описує розподіл швидкостей вітру за умови, що параметр масштабу c близький до середньої швидкості вітру, а параметр форми k знаходиться в діапазоні від 1,78 до 2,33. При значенні $k=2$ розподіл Вейбулла набуває вигляду розподілу Релея, який широко використовується для оцінювання вітроенергетичного потенціалу території:

$$\Phi(V) = \frac{2}{c^2} V \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^2 \right]$$

Для обчислення параметра масштабу c розподілу Вейбулла використовується вираз:

$$c = \frac{1}{V_{sp} \Gamma(1 + 1/k)}$$

Для визначення параметра форми k використовують графічний метод, заснований на аналізі інтегрального розподілу повторюваності швидкостей вітру. Значення параметра k обчислюється як котангенс кута нахилу лінії апроксимації до осі абсцис на відповідному графіку.

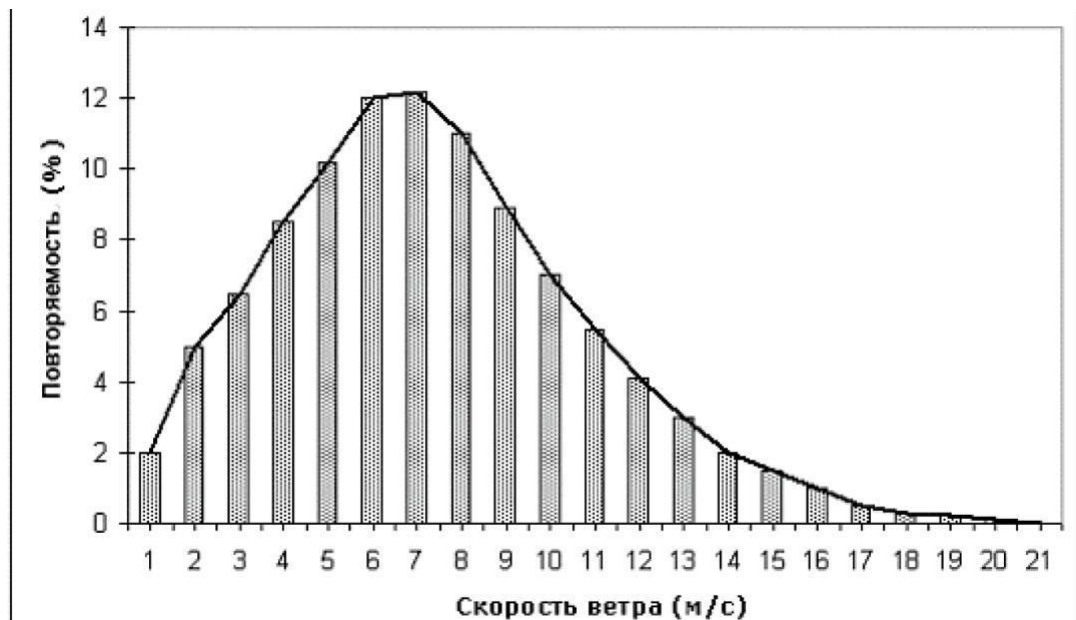


Рисунок 1.3. Графік та гістограма функції Вейбулла повторення швидкості вітру

Підіймальна сила та сила аеродинамічного опору, що діють на лопать вітротурбіни, визначаються профілем її аеродинамічної поверхні, кутом атаки та відносною швидкістю набігаючого повітряного потоку. Для забезпечення ефективної роботи турбіни необхідно досягати високих значень коефіцієнта

підіймальної сили та водночас мінімізувати коефіцієнт аеродинамічного опору, що сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії установки.

Коефіцієнт обертового моменту:

$$C_M = \frac{M}{1/2 \rho A V^2 c}$$

де ρ — густина повітря; A — площа обдування вітроколеса; V — швидкість вітру; c — довжина хорди.

Коефіцієнт підйому

$$C_L = \frac{L}{1/2 \rho A V^2}$$

Коефіцієнт гальмування:

$$C_D = \frac{D}{1/2 \rho A V^2}$$

Потужність вітрового потоку визначається як кількість кінетичної енергії повітряних мас, що проходять через одиницю площі, перпендикулярної до напрямку вітру, за одиницю часу. Цей показник є основною характеристикою вітроенергетичного потенціалу. Потужність, яку може розвинути вітроколесо за заданої швидкості вітру, визначається параметрами повітряного потоку, площею ометання ротора та коефіцієнтом використання енергії вітру. V_0 :

3

$$P = C_P A \overline{\rho V^3}$$

де C_P — коефіцієнт потужності є показником ефективності використання енергії вітру вітроколесом і визначає частку енергії повітряного потоку, що перетворюється на механічну потужність.

Кожна вітроенергетична установка характеризується мінімальною швидкістю вітру, необхідною для початку роботи. Даний параметр називають швидкістю запуску або пусковою швидкістю. Для більшості малопотужних вітротурбін, що використовуються в індивідуальних системах електропостачання, її значення становить приблизно 2,5–3 м/с. За нижчих швидкостей повітряного потоку обертання ротора є недостатнім для забезпечення генерації електричної енергії.

Зі збільшенням швидкості вітрового потоку зростає й обсяг виробленої вітроенергетичною установкою електричної енергії. При цьому потужність, що може бути отримана від вітру, характеризується кубічною залежністю від його швидкості. Отже, при подвоєнні швидкості вітру потенційна енергія повітряного потоку збільшується у вісім разів. Наприклад, зростання швидкості вітру з 3 до 6 м/с забезпечує збільшення енергетичного потенціалу у $2^3 = 8$ разів. Саме тому території зі стабільними та інтенсивними вітрами є найбільш перспективними для розміщення вітроенергетичних установок.

Для кожної вітротурбіни визначається номінальна швидкість вітру — значення, за якого установка досягає своєї розрахункової потужності та працює з максимальною ефективністю. Для автономних вітроенергетичних систем невеликої потужності цей показник зазвичай перебуває в діапазоні від 8 до 12 м/с. За досягнення номінальної швидкості вітру генератор забезпечує максимальний рівень виробництва електричної енергії, передбачений його технічними характеристиками.

За надмірного збільшення швидкості вітру вітроенергетична установка може автоматично припиняти роботу з метою захисту обладнання від механічних перевантажень. Граничне значення швидкості вітру, при якому відбувається зупинка турбіни, називають швидкістю відключення. Перевищення цього показника може призвести до пошкодження лопатей, ротора та інших конструктивних елементів установки, тому сучасні вітротурбіни оснащуються системами автоматичного захисту, які забезпечують безпечну експлуатацію обладнання в несприятливих погодних умовах.

Однією з особливостей вітроенергетики є нестабільність виробництва електроенергії, що обумовлена природними коливаннями швидкості вітру протягом доби та в різні пори року. У зв'язку з цим автономна вітроенергетична установка не завжди здатна гарантувати безперервне електропостачання споживачів. Для підвищення надійності системи електрозабезпечення доцільним є використання накопичувачів енергії, зокрема акумуляторних батарей, які забезпечують зберігання надлишкової електроенергії та її подальше використання в періоди недостатньої вітрової активності.

Акумуляторні батареї є важливим елементом автономних вітроенергетичних систем, оскільки забезпечують накопичення надлишкової електричної енергії, виробленої вітрогенератором за сприятливих вітрових умов. У періоди високої інтенсивності вітру, коли обсяг генерованої електроенергії перевищує поточні потреби споживача, надлишок енергії спрямовується на заряджання акумуляторних батарей. Надалі накопичена енергія може використовуватися для живлення електричних навантажень у періоди зниження швидкості вітру або його повної відсутності.

Застосування акумуляторних батарей дає змогу компенсувати нерівномірність виробництва електроенергії, характерну для вітроенергетичних установок. Система накопичення енергії виконує функцію буфера, який згладжує коливання генерованої потужності та забезпечує стабільне електропостачання споживачів. Навіть у випадках тимчасового припинення або суттєвого зменшення виробництва електроенергії внаслідок несприятливих вітрових умов акумулятори підтримують безперервність енергозабезпечення. Завдяки цьому підвищується надійність автономної енергосистеми, а процес електропостачання стає більш стабільним, прогнозованим та ефективним.

Крім забезпечення резервного електроживлення, використання акумуляторних батарей у складі автономної вітроенергетичної системи сприяє зменшенню залежності від зовнішніх джерел електроенергії, зокрема централізованих електричних мереж. Це має особливе значення для приватних будинків, розташованих у віддалених населених пунктах або районах із

недостатньо розвиненою енергетичною інфраструктурою. Такий підхід дозволяє підвищити рівень енергетичної автономності споживачів, а також знизити витрати на придбання електроенергії з мережі.

Для умов Кіровоградської області швидкість вітру є одним із визначальних чинників ефективності роботи автономних вітроенергетичних установок. З метою досягнення максимального рівня виробництва електроенергії та забезпечення надійного електропостачання необхідно здійснювати обґрунтований вибір типу та потужності вітроустановки з урахуванням місцевих кліматичних особливостей. Аналіз регіональних вітрових ресурсів дає змогу оптимізувати параметри системи та забезпечити її ефективну роботу навіть за відносно невисоких середньорічних швидкостей вітру, характерних для даного регіону.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК І МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Етапи розвитку та сучасний стан світової вітроенергетики

Вітроенергетика має багатовікову історію розвитку, а використання енергії вітру бере свій початок ще з часів найдавніших цивілізацій. Одним із перших і найважливіших напрямів застосування вітрової енергії було судноплавство. Протягом багатьох століть вітрила слугували основним засобом руху морських суден, і лише з початком промислової революції їх поступово витіснили парові двигуни. Про раннє використання енергії вітру свідчать археологічні знахідки поблизу Александрії в Єгипті, де було виявлено залишки кам'яних вітряних млинів, датованих II–I ст. до н. е.

Важливий етап розвитку вітроенергетики пов'язаний із Нідерландами, де в XIV столітті вітрові установки почали широко використовувати для осушення заболочених земель та водойм. Завдяки вдосконаленню конструкції вітряків стало можливим виконання масштабних меліоративних робіт. У 1582 році в країні було введено в експлуатацію першу вітрову олійню, а згодом — паперову мануфактуру, що працювала за аналогічним принципом. Значним інженерним досягненням того часу стало осушення польдера Бемстер у 1608–1612 роках, для чого використовувалася система з 26 вітродвигунів. Цей проєкт продемонстрував високий потенціал вітрової енергії для вирішення масштабних господарських завдань.

Наприкінці XVI століття енергія вітру почала активно використовуватися також у лісопильній промисловості. Подальший розвиток вітроенергетичних установок супроводжувався вдосконаленням їх конструкції, зокрема поступовим переходом від традиційних вітрильних полотен до більш ефективних лопатевих систем. Це дало змогу значно підвищити ефективність використання енергії вітру. Потужність окремих установок сягала близько 66 кВт. У XIX столітті в Нідерландах експлуатувалося майже 9,5 тис. вітряків,

проте розвиток парових машин і прискорення індустріалізації спричинили поступове скорочення їх кількості. На початку XX століття в країні залишалось приблизно 2,3 тис. вітроенергетичних установок.

Значних успіхів у розвитку вітроенергетики наприкінці XIX століття досягла також Данія. У цей період у країні працювало близько 34 тис. вітродвигунів із сумарною встановленою потужністю близько 220 МВт. Важливим поштовхом для подальшого розвитку галузі стала державна програма, започаткована у 1880 році та спрямована на створення потужніших вітроенергетичних установок. Уже до 1920 року в Данії було введено в експлуатацію сотні чотирилопатевих роторних систем діаметром близько 25 м. Ці установки працювали спільно з електричними генераторами та забезпечували часткове покриття потреб країни в електроенергії, що стало одним із перших прикладів використання вітрової енергії для централізованого електропостачання.

У повоєнний період Данія продовжила розвиток вітроенергетики, реалізувавши низку дослідницьких проєктів зі створення вітроенергетичних установок потужністю від 12 до 210 кВт. Проте проведені у 1970-х роках техніко-економічні дослідження показали, що вартість електроенергії, виробленої за допомогою вітрових установок, приблизно вдвічі перевищувала собівартість електроенергії теплових електростанцій. Це призвело до скорочення державної підтримки та припинення фінансування більшості проєктів у цій сфері.

Водночас у Німеччині активно проводилися роботи з удосконалення конструкцій вітроенергетичних установок. Основна увага приділялася розробці легких вітроколів, оснащених системами регулювання кута атаки лопатей та стабілізації частоти обертання ротора. Важливою особливістю цих установок стало використання сучасних на той час полімерних і склопластикових матеріалів, а також трубчастих веж із тросовими розтяжками. Найпотужніша експериментальна установка, що проходила випробування у 1955–1965 роках, забезпечувала вироблення до 130 кВт електричної потужності за швидкості

вітру близько 9 м/с, підтверджуючи перспективність подальшого вдосконалення вітроенергетичних технологій.

У 1960–1970 роках у передмісті Парижа було споруджено та введено в експлуатацію три великі вітроенергетичні установки, оснащені трилопатеvim аеродинамічними роторами. Найпотужніша з них мала номінальну потужність близько 900 кВт при швидкості вітру 17,5 м/с. Конструкція установки передбачала використання вітроколеса діаметром приблизно 32 м, змонтованого на башті аналогічної висоти. У верхній частині башти розташовувалися трансмісійний механізм і генераторне обладнання. Одночасно у Франції проводилися дослідження та випробування вітрогенераторів із вертикальною віссю обертання, які розглядалися як перспективна альтернатива традиційним конструкціям.

У Великій Британії в другій половині 1940-х — 1950-х років основна увага приділялася дослідженню характеристик вітрового режиму та розробленню нових типів вітроенергетичних установок. У 1955 році на Оркнейських островах було встановлено експериментальний вітродвигун розрахунковою потужністю близько 120 кВт, призначений для роботи за швидкості вітру 16,6 м/с. У цей самий період у Великій Британії та Алжирі випробовувалися вітроустановки з пневматичною системою передачі енергії. Проте результати досліджень показали їх нижчу ефективність порівняно з традиційними горизонтально-осьовими вітроенергетичними установками, що обмежило подальше поширення таких технічних рішень.

У Сполучених Штатах Америки малопотужні вітродвигуни тривалий час широко використовувалися для підйому води та автономного електропостачання віддалених об'єктів. Їх номінальна потужність зазвичай становила близько 0,78 кВт. Уже в середині XIX століття кількість таких установок перевищувала 6 мільйонів одиниць, що свідчить про значне поширення вітроенергетичних технологій у господарській діяльності країни.

Типова водопідйомна установка оснащувалася суцільнометалевим ротором діаметром близько 4,7 м. За швидкості вітру 7,7 м/с вона забезпечувала

потужність близько 125 Вт і могла подавати до 165 л води за хвилину на висоту до 8 м. Для автоматичного орієнтування ротора за напрямком вітру використовувалося хвостове оперення, а передача механічної енергії до насоса здійснювалася за допомогою системи валів і шатунно-кривошипного механізму.

Незважаючи на активний розвиток централізованих електромереж у США з 1930-х років, окремі вітронасосні установки продовжують експлуатуватися у віддалених районах західної частини країни. Це підтверджує їхню надійність, простоту конструкції та доцільність використання в місцях, де доступ до традиційних джерел енергії є обмеженим.

У 1933 році американський дослідник Путмен, вивчаючи взаємозв'язок між геометричними параметрами вітроенергетичних установок та їх енергетичною ефективністю, дійшов висновку, що для забезпечення економічно доцільного виробництва електроенергії необхідно суттєво збільшувати розміри вітроагрегатів. Ця ідея стала основою для створення однієї з найпотужніших на той час вітроенергетичних установок.

У співпраці з відомим аеродинаміком Теодором фон Карманом було розроблено вітроенергетичну систему для енергетичної компанії Central Vermont Public Service. Установка, відома під назвою «Сміт–Путмен», оснащувалася дволопатеvim аеродинамічним ротором діаметром 50 м і масою близько 15 т. За частоти обертання ротора 29 об/хв агрегат забезпечував виробництво електричної потужності до 1,35 МВт. Для свого часу це був один із наймасштабніших і найтехнологічніших проєктів у сфері вітроенергетики, який продемонстрував можливість використання великих вітроенергетичних установок для промислового виробництва електроенергії.

На початку XX століття розвиток промисловості та широке впровадження парових машин, двигунів внутрішнього згоряння й електричних приводів суттєво змінили структуру енергоспоживання. Унаслідок цього традиційні вітряки та малопотужні вітроенергетичні установки поступово втратили своє провідне значення в більшості сфер господарської діяльності. Їх використання

збереглося переважно в сільському господарстві, де вони продовжували виконувати окремі технологічні функції, зокрема водопостачання та механічний привід обладнання.

Вагомий внесок у розвиток теоретичних основ вітроенергетики зробив видатний учений-механік Микола Єгорович Жуковський. Ним були розроблені наукові засади роботи швидкохідних вітродвигунів та досліджені основні аеродинамічні процеси, що визначають ефективність перетворення енергії вітру. Сформульовані вченим теоретичні положення стали фундаментом для подальшого розвитку вітроенергетичних технологій і створення більш досконалих та ефективних вітроенергетичних установок.

У межах програм електрифікації та механізації сільського господарства значна увага приділялася розвитку вітроенергетичних технологій. Науковці та інженери розробили низку перспективних конструкцій і технічних рішень для вітроенергетичних установок різного призначення. Основними напрямками досліджень були підвищення надійності обладнання, удосконалення його енергетичних характеристик, а також адаптація конструкцій до умов експлуатації в аграрному секторі.

Одночасно на початку XX століття розпочалося серійне виробництво малопотужних електричних вітроагрегатів, оснащених генераторами для виробництва електроенергії. Такі установки використовувалися переважно для автономного електропостачання окремих споживачів, фермерських господарств і виробничих об'єктів, розташованих у районах, віддалених від централізованих електричних мереж. Їх застосування сприяло підвищенню рівня енергозабезпечення сільських територій та стало важливим етапом у розвитку децентралізованої енергетики.

У 1930-х роках активно розглядалися перспективи широкомасштабного використання енергії вітру. Одним із найамбітніших задумів того часу був проект вітроелектричного комплексу встановленою потужністю 5,5 МВт. Однак реалізувати його не вдалося через технічні та економічні обмеження, характерні для тогочасного рівня розвитку вітроенергетики. Водночас менш

масштабний проєкт вітроелектричної станції потужністю 100 кВт був успішно реалізований. Станцію спорудили приблизно за 35 км від Ялти, де вона стала одним із найбільш значущих вітроенергетичних об'єктів свого часу.

Конструкція станції передбачала встановлення 28-метрової башти, на якій розміщувалися генераторне обладнання та система керування. Для автоматичного орієнтування установки за напрямком вітру використовувалася оригінальна конструкція похилої опори, змонтованої на рухомому візку. У розробленні проєкту брали участь відомі фахівці у сфері вітроенергетики, серед яких були Р. В. Секторов, Г. Х. Сабінін, В. В. Уткін-Єгоров, М. В. Красовський та В. Г. Шухов. Вітроелектрична станція успішно експлуатувалася близько трьох років, проте була зруйнована під час бойових дій у період Другої світової війни.

У 1940–1950-х роках розвиток вітроенергетики набув нових масштабів. У цей період активно здійснювалося будівництво вітроелектричних установок, а також серійне виробництво універсальних і спеціалізованих вітродвигунів різного призначення. Найбільшого поширення набули агрегати потужністю від 0,8 до 12 кВт, оснащені механічними або електричними системами передачі енергії. Завдяки задовільним техніко-економічним характеристикам вони широко використовувалися в сільському господарстві для електропостачання, водопостачання та виконання інших виробничих завдань.

Подальший розвиток галузі супроводжувався створенням нових типів швидкохідних вітроагрегатів, оснащених пневматичними приводами, удосконаленими системами керування та регулювання режимів роботи, а також більш ефективним генераторним і насосним обладнанням. Важливим етапом у розвитку світової вітроенергетики стала енергетична криза початку 1970-х років, спричинена різким зростанням цін на нафту та залежністю багатьох країн від імпорتنих енергоносіїв. Ці події привернули увагу до проблем енергетичної безпеки та стимулювали активний пошук альтернативних джерел енергії. У результаті значно зріс інтерес до відновлюваної енергетики, зокрема до

технологій використання енергії вітру, що стало поштовхом до нового етапу розвитку вітроенергетичної галузі у світі.

У розвитку світової вітроенергетики в період 1990–2020 років можна виокремити три основні стадії, кожен із яких характеризувався розширенням географії використання вітрової енергії та суттєвим зростанням встановлених генеруючих потужностей.

Перша стадія (1975–1989 рр.) охоплював 14 країн, серед яких були Бельгія, Данія, Німеччина, Греція, Італія, Нідерланди, Іспанія, Швеція, Велика Британія, Канада, США, Індія, Японія та Португалія. У цей період лідируючі позиції за темпами розвитку вітроенергетики посідали США, Данія та Німеччина. Саме в цих країнах було зосереджено найбільші обсяги введення нових потужностей. Наприкінці десятиліття встановлена потужність вітроенергетичних установок у США досягла 1600 МВт, у Данії — 330 МВт, а в Німеччині — 70 МВт.

Наведені результати свідчать, що саме протягом 1980-х років було закладено основу для подальшого стрімкого розвитку світової вітроенергетики. У цей період відбулося формування перших масштабних ринків вітроенергетичних технологій, а також накопичення досвіду проектування, будівництва та експлуатації сучасних вітроенергетичних установок.

Друга стадія розвитку світової вітроенергетики (1990–2010 рр.) характеризувався стрімким зростанням галузі та значним розширенням її географії. Кількість країн, у яких експлуатувалися вітроелектростанції, збільшилася до 40. У цей період лідером світового ринку вітроенергетики стала Німеччина, яка зберігала провідні позиції до 2010 року.

Станом на 2005 рік до десятки країн із найбільшою встановленою потужністю вітроенергетичних установок входили Швеція (240 МВт), Китай (320 МВт), Велика Британія (410 МВт), Італія (430 МВт), Нідерланди (450 МВт), Індія (1230 МВт), Іспанія (2240 МВт), Данія (2300 МВт), США (2580 МВт) та Німеччина (6125 МВт). Особливо високими темпами розвивалася

вітроенергетика в Німеччині, США, Данії та Іспанії, де було створено потужну виробничу та науково-технічну базу для подальшого розширення галузі.

Наведені показники свідчать про суттєві структурні зміни у світовій енергетиці. Якщо на початку розвитку вітроенергетика розглядалася переважно як локальне джерело енергії, то наприкінці XX століття вона перетворилася на повноцінну галузь електроенергетики, здатну забезпечувати значні обсяги виробництва електроенергії та конкурувати з традиційними джерелами генерації.

Третя стадія розвитку світової вітроенергетики (2010–2020 рр.) характеризувався остаточним формуванням галузі як глобального сегмента енергетики. У цей період вітроенергетичні установки експлуатувалися вже у 85 країнах світу, а 15 держав досягли рівня встановленої потужності понад 1600 МВт. Значне розширення географії використання вітрової енергії стало свідченням зростання її економічної привабливості та технологічної зрілості.

Протягом цього десятиліття Сполучені Штати Америки знову посіли провідне місце у світовому рейтингу за встановленою потужністю вітроелектростанцій, досягнувши показника 26 250 МВт. Високі темпи розвитку також демонстрували країни Європи та Азії, що сприяло подальшому зміцненню позицій вітроенергетики на світовому енергетичному ринку.

Наведені результати свідчать про якісну трансформацію ролі вітроенергетики у світовій енергетичній системі. Якщо на початкових етапах розвитку вона розглядалася переважно як допоміжне джерело енергії, то на початку XXI століття вітроенергетика стала одним із ключових напрямів відновлюваної енергетики та важливим інструментом забезпечення енергетичної безпеки, зниження залежності від викопного палива й скорочення викидів парникових газів.

Станом на 2010 рік частка електроенергії, виробленої вітроенергетичними установками, перевищила 1,2 % від загального світового обсягу генерації електроенергії. Водночас у низці країн цей показник був значно вищим за середньосвітовий рівень. Зокрема, частка вітрової генерації становила близько

7 % у Німеччині, 9,3 % у Португалії, 11,9 % в Іспанії та понад 25 % у Данії. Такі показники свідчать про високий рівень інтеграції вітроенергетики в національні енергосистеми та її важливу роль у забезпеченні електроенергією окремих держав.

Особливо показовими є темпи зростання встановлених потужностей вітроенергетики у світі. У період з 1990 по 2010 рік їх сумарний обсяг збільшився з 1,15 до 121,92 ГВт. Найбільш динамічним став період 2000–2009 років, коли середньорічний приріст потужностей становив близько 30 %. Подібні темпи розвитку були характерні лише для окремих секторів відновлюваної енергетики, зокрема сонячної фотоелектричної генерації.

За підсумками 2010 року лідерами світової вітроенергетики за встановленою потужністю були США (25 220 МВт), Німеччина (23 800 МВт), Іспанія (16 800 МВт), Китай (12 300 МВт), Індія (9 600 МВт), Італія (3 800 МВт), Франція (3 450 МВт), Велика Британія (3 300 МВт), Данія (3 050 МВт) та Португалія (2 900 МВт). Наведені показники підтверджують, що на початку XXI століття вітроенергетика перетворилася на один із найдинамічніших секторів світової енергетики та стала важливою складовою переходу до використання відновлюваних джерел енергії.

Наведені дані свідчать про те, що на початку XXI століття вітроенергетика остаточно сформувалася як самостійна та конкурентоспроможна галузь електроенергетики. Високі темпи зростання встановлених потужностей, удосконалення технологій та зниження вартості виробництва електроенергії сприяли зміцненню її позицій у світовому енергетичному секторі.

З метою подальшого розвитку галузі та розширення використання енергії вітру було започатковано міжнародну програму «Wind Force 12», основною метою якої стало досягнення 12-відсоткової частки вітрової генерації у світовому виробництві електроенергії. Реалізація цієї ініціативи передбачала активне впровадження сучасних вітроенергетичних технологій, розширення

генеруючих потужностей і підвищення ефективності використання вітрових ресурсів.

Згідно з прогнозами Європейської асоціації вітроенергетики, до 2035 року сумарна встановлена потужність вітроелектростанцій у країнах Європи могла досягти 350 ГВт. Такі прогнози підтверджували високий потенціал галузі та її важливу роль у забезпеченні енергетичної безпеки, диверсифікації джерел енергії та скороченні негативного впливу енергетики на довкілля.

Більшість країн, які активно впроваджують відновлювані джерела енергії, передбачали суттєве збільшення потужностей вітроелектростанцій. У багатьох випадках стратегічні плани розвитку галузі передбачали зростання встановлених потужностей у 5–15 разів. Реалізація таких амбітних цілей ґрунтувалася на значних інвестиціях, наявності перспективних проєктів та укладенні довгострокових угод у сфері вітроенергетики.

Одним із найважливіших напрямів подальшого розвитку галузі стало освоєння морських акваторій для розміщення вітроенергетичних установок. Обмеженість вільних земельних ресурсів у густонаселених країнах Європи, зокрема у Великій Британії та Німеччині, стимулювала активне впровадження офшорної вітроенергетики. Розміщення вітроелектростанцій у морських районах дозволяє ефективніше використовувати вітровий потенціал завдяки вищим і більш стабільним швидкостям вітру порівняно з наземними територіями.

Висока інтенсивність та рівномірність вітрових потоків у морських акваторіях сприяє збільшенню виробництва електроенергії та підвищенню ефективності роботи вітроенергетичних установок. Саме тому офшорна вітроенергетика розглядається як один із найперспективніших напрямів розвитку світової відновлюваної енергетики.

Попри вищі капітальні вкладення та експлуатаційні витрати, характерні для морських вітроелектростанцій, їх економічна ефективність значною мірою забезпечується завдяки вищій продуктивності. Стабільніші та потужніші вітрові потоки в морських акваторіях дозволяють суттєво збільшити обсяги

виробництва електроенергії, що компенсує додаткові витрати на будівництво й обслуговування таких об'єктів.

Завдяки високому вітроенергетичному потенціалу, значним можливостям для нарощування потужностей і відсутності суттєвих обмежень щодо використання земельних ресурсів офшорна вітроенергетика сьогодні розглядається як один із найперспективніших напрямів розвитку світової відновлюваної енергетики. Її подальше впровадження відіграє важливу роль у процесах декарбонізації енергетичного сектору та забезпечення сталого енергетичного розвитку.

2.2 Конструктивні різновиди вітроенергетичних установок

Вітрові турбіни є технічними пристроями, призначеними для перетворення кінетичної енергії повітряних потоків на механічну або електричну енергію. Завдяки цьому забезпечується ефективне використання відновлюваного енергетичного ресурсу вітру для вирішення різноманітних господарських, виробничих і побутових завдань.

Отримана механічна енергія найчастіше використовується для приводу насосного обладнання та систем водопідйому. Такі установки набули широкого поширення в сільському господарстві, а також у віддалених і важкодоступних районах, де відсутнє централізоване електропостачання або його створення є економічно недоцільним. Використання вітрових установок у таких умовах дозволяє забезпечити автономне водопостачання та підвищити енергетичну незалежність господарських об'єктів.

Електрична енергія, вироблена вітроенергетичними установками, використовується для забезпечення потреб побутових, комерційних і промислових споживачів. Залежно від умов експлуатації такі установки можуть працювати як у складі централізованих електроенергетичних систем, так і в автономному режимі, забезпечуючи електропостачання віддалених об'єктів та територій.

Важливим напрямом розвитку сучасної вітроенергетики є інтеграція вітроенергетичних установок з іншими джерелами генерації в межах гібридних енергетичних систем. Поєднання вітрових установок із сонячними електростанціями, дизельними генераторами або накопичувачами енергії дозволяє підвищити надійність електропостачання, забезпечити більш стабільний режим роботи енергосистеми та покращити ефективність використання енергетичних ресурсів.

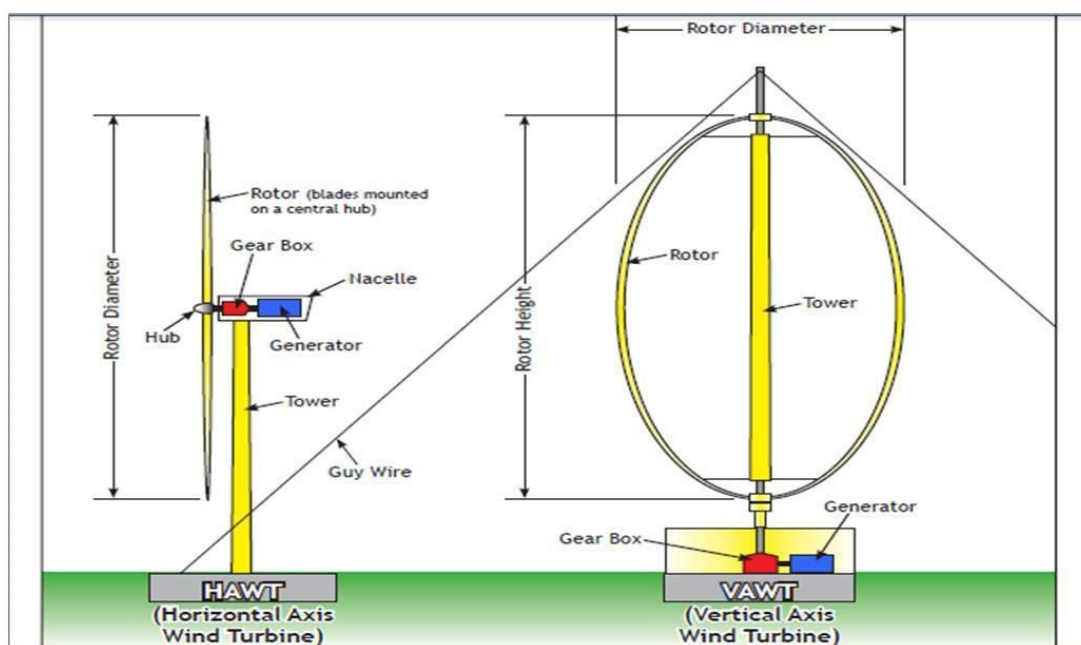


Рисунок 2.1. Два основні типи ВЕУ

За конструкцією та орієнтацією осі обертання ротора вітроенергетичні установки поділяються на два основні типи: установки з горизонтальною віссю обертання та установки з вертикальною віссю обертання. Кожен із цих типів має свої конструктивні особливості, принцип роботи, переваги та недоліки, що визначають сферу їх практичного застосування.

Вітроенергетичні установки з горизонтальною віссю обертання є найбільш поширеними у сучасній енергетиці та використовуються переважно

для виробництва електроенергії у складі наземних і морських вітроелектростанцій. Установки з вертикальною віссю обертання відрізняються простішою орієнтацією щодо напрямку вітру та можуть ефективно працювати в умовах змінних повітряних потоків.

Схематичне зображення вітроенергетичних установок із горизонтальною та вертикальною віссю обертання наведено на рисунку.

Вітроенергетичні установки з горизонтальною віссю обертання є найпоширенішим типом сучасних вітрових турбін. Їх частка становить близько 98 % від загальної кількості вітроагрегатів, що працюють у складі централізованих систем електропостачання. Таке домінування пояснюється високою ефективністю перетворення енергії вітру, надійністю роботи, технологічною зрілістю конструкції та значним досвідом експлуатації в промисловій вітроенергетиці.

Типова вітроенергетична установка з горизонтальною віссю обертання складається з низки основних вузлів і елементів:

- вітроколеса (ротора), яке перетворює кінетичну енергію вітрового потоку на механічну енергію обертання вала;
- гондоли, у якій розміщуються основні механічні та електричні компоненти установки, зокрема редуктор (у разі використання редукторної схеми);
- генератора, що перетворює механічну енергію обертання на електричну, а також допоміжного механічного та електротехнічного обладнання;
- вежі, яка забезпечує необхідну висоту розташування ротора та підтримує гондолу з усім обладнанням;
- електротехнічного та електронного обладнання, до складу якого входять системи керування, силові та сигнальні кабелі, пристрої заземлення, обладнання для підключення до електричної мережі, системи блискавкозахисту та інші елементи автоматизації й захисту;

- фундаменту, призначеного для забезпечення стійкості конструкції та сприйняття статичних і динамічних навантажень, що виникають під час роботи вітроенергетичної установки.

Узгоджена робота зазначених елементів забезпечує ефективне перетворення енергії вітру на електричну енергію та надійне функціонування вітроенергетичної установки в різних умовах експлуатації.

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) класифікують за низкою ознак, серед яких основними є конструкція вітроколеса, принцип перетворення енергії, швидкохідність ротора, орієнтація осі обертання відносно поверхні Землі, а також інші конструктивні та експлуатаційні характеристики. Така класифікація дозволяє оцінити особливості роботи різних типів установок і визначити сфери їх найбільш ефективного застосування.

Під час взаємодії повітряного потоку з лопатями вітроколеса виникає комплекс аеродинамічних явищ і сил, які визначають ефективність роботи вітроенергетичної установки. Внаслідок поєднання швидкості набігаючого повітряного потоку та швидкості руху лопаті формується відносна швидкість повітря щодо поверхні лопаті. Саме вона визначає характер аеродинамічної взаємодії та величину сил, що діють на ротор.

У процесі такої взаємодії виникають:

а) сила аеродинамічного опору F_c — сила, напрямлена вздовж вектора відносної швидкості повітряного потоку та така, що протидіє руху лопаті;

б) підймальна сила F_n — сила, спрямована перпендикулярно до сили опору. На відміну від авіаційних конструкцій, у вітроенергетиці вона не створює підйомної дії, а забезпечує обертання ротора та перетворення енергії вітру на механічну енергію;

в) завихрення повітряного потоку — явище, що супроводжується утворенням обертального руху повітря за вітроколесом унаслідок відбору частини енергії набігаючого потоку;

г) турбулентність повітряного потоку — хаотичні зміни швидкості та напрямку руху окремих частинок повітря, які виникають як перед лопатями, так і за ними та можуть впливати на ефективність роботи установки;

д) аеродинамічне гальмування потоку — зменшення швидкості набігаючого повітря внаслідок відбору енергії вітроколесом і створення ним перешкоди для подальшого руху повітряних мас.

Сукупна дія зазначених аеродинамічних факторів визначає енергетичні характеристики вітроенергетичної установки, її коефіцієнт корисної дії та ефективність використання енергії вітру.

Ступінь перекриття вітрового потоку лопатями характеризується параметром, який називається коефіцієнтом геометричного заповнення. Він визначається як відношення площі проєкції всіх лопатей на площину обертання ротора до загальної площі, що омивається вітроколесом. Значення цього коефіцієнта безпосередньо залежить від кількості лопатей: зі збільшенням їх числа коефіцієнт геометричного заповнення зростає. Даний параметр суттєво впливає на аеродинамічні характеристики та режим роботи вітроенергетичної установки.

Як зазначалося раніше, одним із основних критеріїв класифікації вітроенергетичних установок є орієнтація осі обертання ротора відносно поверхні Землі. За цією ознакою всі вітрові турбіни поділяються на два основні типи: установки з горизонтальною віссю обертання та установки з вертикальною віссю обертання. Кожен із цих типів має свої конструктивні особливості, переваги, недоліки та сфери практичного застосування.

2.3 Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки

Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки (HAWT) є найбільш поширеним типом сучасних вітрових турбін. Їх характерною особливістю є розміщення головного вала ротора та електричного генератора у верхній частині башти, всередині гондоли. При цьому площа обертання вітроколеса

розташована перпендикулярно до напрямку набігаючого повітряного потоку, що забезпечує ефективне використання енергії вітру.

У більшості конструкцій між ротором і генератором встановлюється редуктор, призначений для підвищення частоти обертання вала до значень, необхідних для стабільної та ефективної роботи генератора. Найпоширенішими є турбіни з двома або трьома лопатями, причому трилопатеві конструкції набули найбільшого поширення завдяки оптимальному поєднанню ефективності, надійності та плавності роботи.

Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки можуть працювати як за схемою орієнтації ротора проти вітру, так і за вітром. Проте переважна більшість сучасних установок використовує схему роботи проти вітру, оскільки вона забезпечує кращі аеродинамічні характеристики, вищу ефективність перетворення енергії вітрового потоку, нижчий рівень шуму та менші механічні навантаження на елементи конструкції. Завдяки цим перевагам горизонтально-осьові турбіни є основою сучасної промислової вітроенергетики та широко застосовуються як у складі наземних, так і морських вітроелектростанцій.

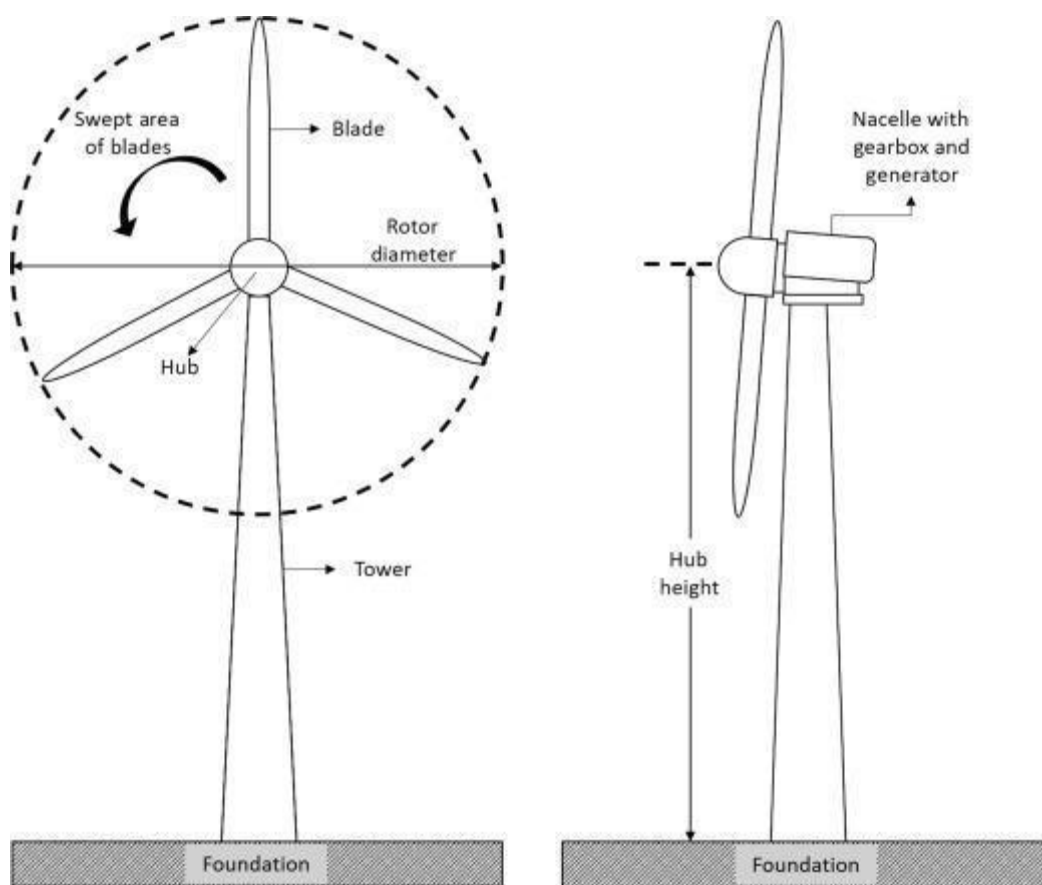


Рисунок 2.2. Схема (HAWT) — горизонтально-осьової ВЕУ

Вітроенергетичні установки з горизонтальною віссю обертання (HAWT) є найпоширенішим типом сучасних вітрових турбін і широко застосовуються для виробництва електроенергії в промислових масштабах. У таких установках аеродинамічні лопаті закріплюються на роторі, який може розташовуватися як перед баштою (навітряна схема), так і за нею (підвітряна схема) відносно напрямку повітряного потоку.

У більшості сучасних конструкцій використовуються ротори з двома або трьома лопатями. Найбільшого поширення набули трилопатеві турбіни, оскільки вони забезпечують оптимальне поєднання аеродинамічної ефективності, механічної надійності та стабільності роботи. Така конструкція сприяє рівномірному обертанню ротора, зменшенню вібрацій і навантажень на основні вузли установки.

Завдяки високим аеродинамічним характеристикам горизонтально-осьові вітроенергетичні установки здатні працювати при відносно високих швидкостях обертання ротора та ефективно перетворювати кінетичну енергію вітру на механічну, а згодом і на електричну енергію. Саме ці переваги зумовили їх домінування в сучасній вітроенергетичній галузі.

Вітроенергетичні установки підвітряного типу потребують застосування спеціальних систем орієнтації, які забезпечують правильне положення ротора відносно напрямку вітрового потоку. Такі системи можуть бути як активними, із використанням приводних механізмів керування, так і пасивними, що працюють за рахунок аеродинамічних сил.

Для навітряних конструкцій характерним є застосування ротора з певною конічністю лопатей, що сприяє його природному самоорієнтуванню за напрямком вітру. Завдяки цьому зменшується потреба в додаткових механізмах керування положенням установки. Однак такі системи можуть бути схильними до виникнення кутових коливань навколо вертикальної осі (yaw-коливань), особливо за низьких швидкостей вітру під час процесу орієнтації ротора.

Подібна нестабільність може призводити до погіршення аеродинамічних характеристик, збільшення механічних навантажень на конструктивні елементи та зниження ефективності перетворення енергії вітру. Тому забезпечення стабільної орієнтації ротора є одним із важливих завдань під час проєктування та експлуатації горизонтально-осьових вітроенергетичних установок.

Сучасні горизонтально-осьові вітроенергетичні установки (HAWT) працюють за принципом використання аеродинамічної підйимальної сили, яка виникає на лопатях ротора під час їх взаємодії з повітряним потоком. За своїм принципом дії лопаті вітротурбіни подібні до крил літака, оскільки мають спеціальний аеродинамічний профіль, призначений для ефективного перетворення енергії вітру на механічну енергію обертання.

Під час обтікання лопаті повітряний потік розділяється на дві частини, які рухаються вздовж її верхньої та нижньої поверхонь. Завдяки особливій формі профілю швидкість руху повітря над верхньою поверхнею є більшою, ніж під

лопаттю. Унаслідок цього на верхній стороні створюється область зниженого тиску, тоді як на нижній стороні тиск залишається вищим.

Різниця тисків між верхньою та нижньою поверхнями лопаті призводить до виникнення аеродинамічної підйимальної сили. Саме ця сила створює крутний момент на роторі та забезпечує його обертання. Отримана механічна енергія передається через вал до генератора, де перетворюється на електричну енергію. Завдяки використанню підйимальної сили сучасні горизонтально-осьові вітротурбіни характеризуються високою ефективністю та здатністю ефективно працювати навіть за помірних швидкостей вітру.

Разом із численними перевагами горизонтально-осьові вітроенергетичні установки мають певні конструктивні та аеродинамічні особливості. Під час обтікання лопатей повітряним потоком на них діють дві основні аеродинамічні сили — підйимальна сила та сила опору. Підйимальна сила завжди напрямлена перпендикулярно до відносного повітряного потоку, тоді як сила опору діє вздовж його напрямку. За величиною підйимальна сила значно перевищує силу опору, що є однією з головних причин високої ефективності сучасних вітрових турбін.

Переважаюча підйимальна сила над силою опору забезпечує створення значного крутного моменту та дозволяє ротору працювати з високою швидкістю обертання. Саме завдяки цьому горизонтально-осьові вітротурбіни досягають значно вищих показників ефективності порівняно з установками, принцип роботи яких ґрунтується переважно на використанні сили опору повітряного потоку.

Хоча існують конструкції вітротурбін, що частково використовують опірний принцип перетворення енергії, більшість сучасних горизонтально-осьових установок проєктуються таким чином, щоб мінімізувати аеродинамічний опір і максимально використовувати підйимальну силу як основне джерело обертального моменту. Такий підхід забезпечує високий коефіцієнт використання енергії вітру та покращує енергетичні характеристики установки.

Конструктивну схему типової горизонтально-осьової вітроенергетичної установки наведено на рисунку 2.3.

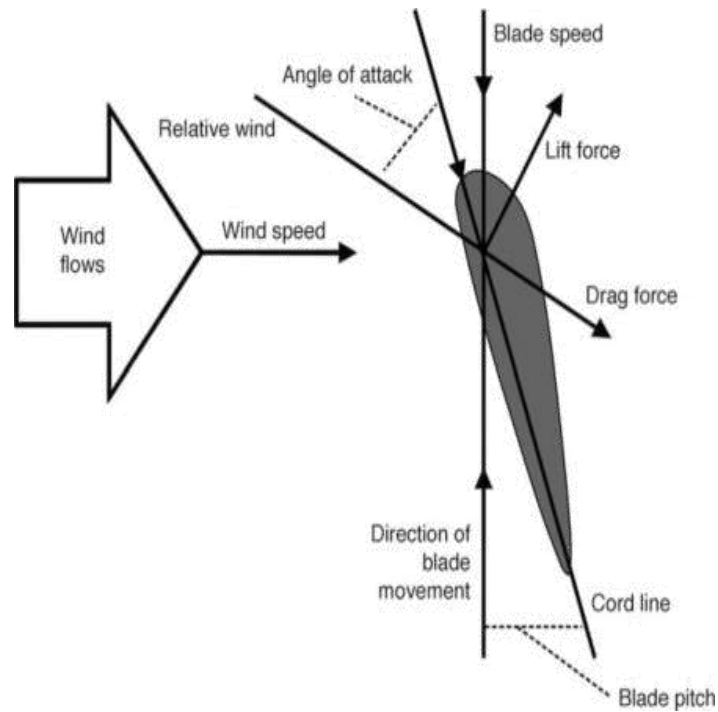


Рисунок 2.3. Підіймальна сила і сила опору

Основні конструктивні елементи горизонтально-осьової вітроенергетичної установки показані на рисунку 2.4.

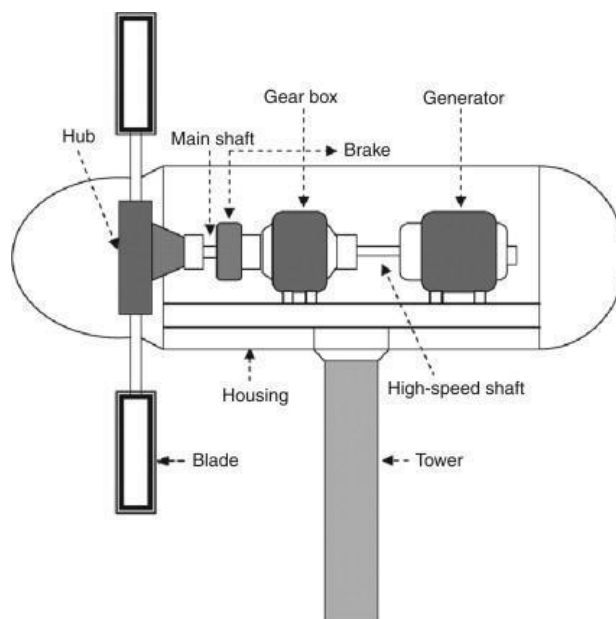


Рисунок 2.4. Конструктивні особливості типової HAWT

Робота вітроенергетичних установок з горизонтальною віссю обертання (HAWT) ґрунтується переважно на використанні аеродинамічної підйимальної сили, що виникає під час взаємодії повітряного потоку з профільованими лопатями ротора. Саме ця сила створює крутний момент, який приводить ротор в обертання та забезпечує перетворення кінетичної енергії вітру на механічну, а згодом — на електричну енергію.

Кінематичні характеристики ротора, зокрема частота його обертання, визначаються конструкцією вітротурбіни, діаметром вітроколеса та умовами експлуатації. Загалом зі збільшенням розмірів ротора швидкість його обертання зменшується, що пояснюється необхідністю обмеження механічних навантажень на конструкцію та забезпечення надійної роботи установки.

Для сучасних промислових вітротурбін мегаватного класу характерний низькообертовий режим роботи. Незважаючи на великі габарити ротора, такі установки здатні ефективно виробляти значні обсяги електроенергії навіть за відносно невисокої частоти обертання. Зокрема, кутова швидкість ротора потужних вітроенергетичних установок зазвичай становить близько 16 об/хв, що є характерною особливістю сучасних великогабаритних вітротурбін.

Передача механічної енергії від низькообертового ротора до генератора в більшості горизонтально-осьових вітроенергетичних установок здійснюється за допомогою редуктора-мультиплікатора. Його основним призначенням є підвищення частоти обертання вала відносно невисоких значень, характерних для ротора, до швидкостей, необхідних для ефективної роботи електричного генератора та виробництва електроенергії встановлених параметрів.

Останніми роками значного поширення набули безредукторні вітроенергетичні установки, відомі як системи з прямим приводом. У таких конструкціях відсутній проміжний механічний вузол у вигляді редуктора, а передача енергії від ротора до генератора здійснюється безпосередньо. Для цього використовуються спеціально розроблені низькошвидкісні генератори великого діаметра, здатні ефективно працювати за невисоких частот обертання ротора.

Застосування прямого приводу дозволяє зменшити кількість рухомих механічних елементів, підвищити надійність установки, знизити витрати на технічне обслуговування та зменшити механічні втрати під час передачі енергії. Саме тому безредукторні конструкції дедалі частіше використовуються у сучасних вітроенергетичних установках великої потужності, особливо в офшорній вітроенергетиці, де надійність обладнання має особливо важливе значення.

У традиційних конструкціях горизонтально-осьових вітроенергетичних установок підвищення частоти обертання від тихохідного ротора до значень, необхідних для ефективної роботи генератора, здійснюється за допомогою багатоступеневої системи зубчастих передач. Така кінематична схема забезпечує досягнення оптимальних параметрів обертання, необхідних для ефективного електромагнітного перетворення механічної енергії в електричну.

Завершальним етапом процесу перетворення енергії є робота генератора, який трансформує механічну енергію обертання ротора в електричну енергію, придатну для подальшого використання або передачі до електричної мережі. Надійна та стабільна робота всіх основних вузлів установки забезпечується

сучасними автоматизованими системами керування. До їх функцій належать орієнтація ротора за напрямком вітру, регулювання потужності, контроль режимів роботи, а також забезпечення безпечної експлуатації обладнання в різних погодних умовах.

Кількість лопатей ротора горизонтально-осьової вітроенергетичної установки визначається її призначенням, потужністю та характеристиками вітрового режиму місцевості. За конструктивним виконанням розрізняють одно-, дво-, три- та багатолопатеві ротори. Кожен із цих варіантів має свої особливості щодо аеродинамічної ефективності, швидкохідності та експлуатаційних характеристик. У сучасній промисловій вітроенергетиці найбільшого поширення набули трилопатеві конструкції, які забезпечують оптимальне поєднання енергетичної ефективності, механічної надійності та плавності роботи.

Типові конструктивні схеми горизонтально-осьових вітрових турбін із різною кількістю лопатей наведено на рисунку 2.5.

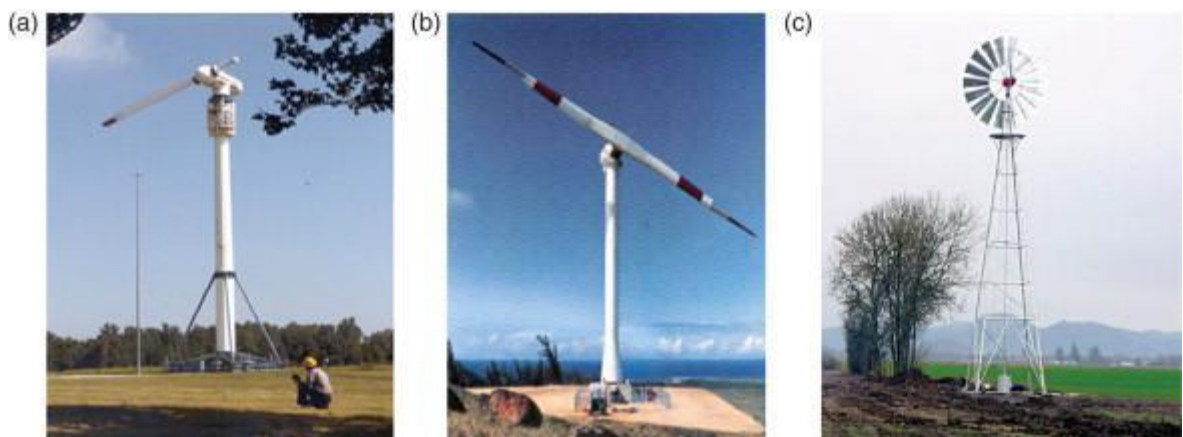


Рис. 2.5. Однолопатеві (а), дволопатеві (b) і багатолопатеві (с) турбіни.

Основною перевагою однолопатевих вітророторів є їх низька матеріаломісткість, що дозволяє суттєво зменшити витрати на виготовлення робочого колеса порівняно з багатолопатеви́ми конструкціями. Оскільки

вартість ротора може становити близько 20–30 % загальної вартості вітроенергетичної установки, скорочення кількості лопатей дає можливість знизити капітальні витрати на створення обладнання. Крім того, менша площа поверхні ротора, що взаємодіє з повітряним потоком, сприяє зменшенню аеродинамічного опору та пов'язаних із ним енергетичних втрат.

Разом із тим однолопатевої конструкції не набули широкого практичного застосування через низку суттєвих технічних недоліків. Найбільш складними проблемами є забезпечення динамічного балансування ротора, підвищені вимоги до систем стабілізації та керування, а також значні механічні навантаження, що виникають під час роботи. Додатковим фактором є їх менш привабливий зовнішній вигляд порівняно з багатолопатеви́ми конструкціями, що також впливає на можливості їх комерційного використання.

Для дволопатеви́х вітророторів характерні подібні недоліки, однак вони проявляються меншою мірою. Такі установки мають меншу масу та нижчу вартість порівняно з трилопатеви́ми аналогами, проте поступаються їм за плавністю роботи, рівнем вібрацій і стабільністю обертання. Саме тому в сучасній промисловій вітроенергетиці найбільшого поширення набули трилопатеві ротори, які забезпечують оптимальний баланс між економічністю, надійністю та аеродинамічною ефективністю.

Саме тому в сучасній промисловій вітроенергетиці найбільшого поширення набули трилопатеві вітроколеса. Така конструкція забезпечує рівномірний розподіл аеродинамічних і механічних навантажень на ротор, що сприяє підвищенню надійності роботи установки, зменшенню вібрацій та збільшенню терміну експлуатації її основних вузлів. Крім того, трилопатеві турбіни характеризуються плавним обертанням і гармонійним зовнішнім виглядом, що є важливим фактором під час розміщення вітроелектростанцій поблизу населених пунктів.

Вітроенергетичні установки з великою кількістю лопатей (6, 8, 12, 18 і більше) використовуються переважно для спеціалізованих завдань, зокрема у водопідйомних та насосних системах. Такі ротори мають значний пусковий

момент, що дозволяє ефективно працювати за невисоких швидкостей вітру та приводити в дію механізми з великим початковим навантаженням.

Особливо актуальним це є для насосних установок із поршневими насосами, робота яких пов'язана з необхідністю подолання статичного тиску водяного стовпа. У момент запуску насосного обладнання виникає значний опір руху, тому початковий крутний момент, необхідний для початку роботи системи, може у 3–4 рази перевищувати його значення в номінальному режимі експлуатації. Саме завдяки високому пусковому моменту багатолопатевої вітроколеса залишаються ефективним рішенням для механічних водопідйомних установок, особливо в автономних системах водопостачання.

Зі збільшенням кількості лопатей зростає коефіцієнт геометричного заповнення ротора, який визначається як відношення сумарної площі проєкції лопатей до площі, що омивається вітровим потоком. Саме цей параметр значною мірою визначає здатність вітроколеса створювати високий пусковий момент і ефективно працювати за невеликих швидкостей вітру. Завдяки цьому багатолопатевої ротори можуть запускатися навіть за слабких повітряних потоків і приводити в дію механізми з великим початковим навантаженням.

Разом із тим збільшення кількості лопатей призводить до зниження швидкохідності ротора. Через невисоку частоту обертання такі вітроколеса малопридатні для безпосереднього приводу електричних генераторів, які потребують значно вищих швидкостей обертання для ефективної роботи.

Ще одним недоліком багатолопатевої конструкцій є зростання аеродинамічних втрат. У міру збільшення кількості лопатей посилюється їх взаємний вплив на повітряний потік, виникає аеродинамічне затінення, а також зростають втрати енергії внаслідок тертя повітря об поверхню лопатей. У результаті знижується коефіцієнт використання енергії вітру та загальна ефективність установки.

З огляду на зазначені особливості багатолопатевої ротори практично не використовуються для виробництва електроенергії у промислових масштабах. Водночас вони залишаються ефективним рішенням для автономних механічних

систем, зокрема водопідйомних і насосних установок, де визначальне значення мають високий пусковий момент і надійність роботи за низьких швидкостей вітру, а не максимальна енергетична ефективність.

За розташуванням ротора відносно напрямку вітрового потоку горизонтально-осьові вітроенергетичні установки поділяються на два основні типи: навітряні (upwind) та підвітряні (downwind). У навітряних конструкціях ротор розміщується перед баштою відносно напрямку вітру, тому повітряний потік спочатку взаємодіє з лопатями, а вже потім проходить повз інші елементи установки (рис. 2.6). У підвітряних установках ротор розташовується за баштою, тоді як гондола та опорна конструкція знаходяться перед ним відносно набігаючого потоку.

Основною перевагою навітряної схеми є відсутність впливу башти на повітряний потік, що надходить до ротора. Завдяки цьому забезпечується більш рівномірне та стабільне обтікання лопатей, зменшуються турбулентні збурення і підвищується ефективність перетворення енергії вітру. Саме з цієї причини навітряна компоновка отримала найбільше поширення у сучасній промисловій вітроенергетиці.

Для підвітряних конструкцій характерним є вплив так званого ефекту аеродинамічного затінення, що виникає внаслідок проходження повітряного потоку через зону за баштою. Це може призводити до періодичних змін навантаження на лопаті, збільшення вібрацій та зниження ефективності роботи ротора. Тому під час проектування підвітряних вітроенергетичних установок особлива увага приділяється вибору відстані між площиною обертання ротора та опорною баштою, що дозволяє мінімізувати негативний вплив аеродинамічних збурень на роботу установки.

З точки зору механічної надійності навітряні вітроенергетичні установки мають низку суттєвих переваг. Розташування ротора перед баштою дозволяє уникнути ризику контакту лопатей з опорною конструкцією навіть за значних вітрових навантажень і деформацій елементів ротора. Завдяки цьому лопаті

можуть мати більш жорстку конструкцію, що сприяє підвищенню надійності та безпеки експлуатації установки.

Для підвітряних схем характерні менш сприятливі умови роботи ротора. Під час обертання лопаті періодично проходять через зону аеродинамічного сліду, що утворюється за баштою. У цій області повітряний потік має підвищену турбулентність і нерівномірний розподіл швидкості, що призводить до виникнення змінних аеродинамічних навантажень на лопаті.

Такі циклічні навантаження спричиняють появу змінних механічних напружень у конструктивних елементах ротора, що негативно впливає на їхню втомну міцність. У результаті може скорочуватися термін служби обладнання, збільшуватися рівень вібрацій та погіршуватися стабільність роботи вітроенергетичної установки. Крім того, нерівномірність аеродинамічного навантаження здатна викликати коливання вихідної потужності генератора, що знижує якість вироблюваної електроенергії та загальну ефективність роботи системи.

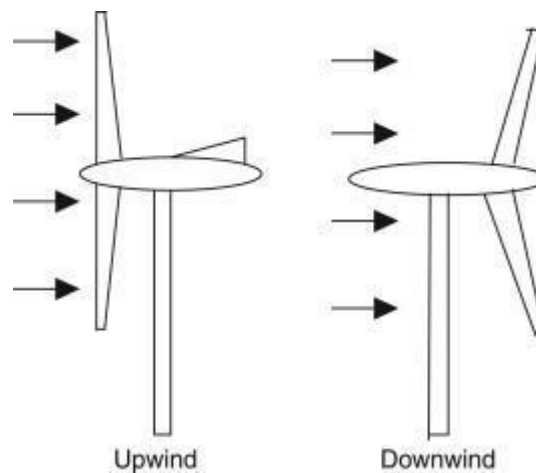


Рисунок 2.6. Навітряні і підвітряні турбіни

2.4. Вертикально-осьові вітроенергетичні установки (VAWT)

Розроблення вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання (VAWT) спрямоване на підвищення ефективності використання

енергії вітру, збільшення потужності установок та покращення їх інтеграції в навколишнє середовище. Завдяки своїм конструктивним особливостям такі установки можуть ефективно працювати в умовах змінних вітрових режимів і використовуватися як у промислових, так і в міських енергетичних системах.

Характерною особливістю вертикально-осьових вітроенергетичних установок є вертикальне або близьке до вертикального розташування головного вала ротора. Така конструкція забезпечує сприйняття енергії повітряного потоку незалежно від його напрямку, що усуває необхідність застосування спеціальних систем орієнтації за вітром.

Завдяки цьому вертикально-осьові турбіни здатні ефективно працювати в умовах частих змін напрямку та швидкості вітру, а також за підвищеної турбулентності повітряних потоків. Ця властивість робить їх перспективними для використання в міській забудові, складних рельєфних умовах та інших місцях, де забезпечення стабільної орієнтації горизонтально-осьових установок може бути ускладненим.

Однією з важливих переваг вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання є можливість розміщення основного обладнання в нижній частині конструкції, безпосередньо біля фундаменту. У такому випадку генератор, редуктор та інші силові вузли розташовуються на рівні землі, що значно спрощує доступ до них під час технічного обслуговування та проведення ремонтних робіт. Це дозволяє зменшити витрати на монтаж і експлуатацію обладнання, а також підвищити зручність його обслуговування протягом усього терміну експлуатації установки.

Ще однією характерною особливістю вертикально-осьових вітроенергетичних установок є їх здатність ефективно працювати незалежно від напрямку вітрового потоку. Завдяки вертикальному розташуванню осі обертання ротор однаково сприймає енергію вітру з будь-якого напрямку, що усуває необхідність використання спеціальних систем орієнтації за вітром.

Відсутність механізмів повороту гондоли та систем азимутального керування дозволяє спростити конструкцію установки, зменшити кількість

рухомих елементів і підвищити її надійність. Крім того, це сприяє зниженню експлуатаційних витрат і полегшує використання таких турбін в умовах змінних та турбулентних вітрових потоків, характерних для міської забудови та складного рельєфу місцевості.

У сучасних умовах розвитку розподіленої енергетики вертикально-осьові вітроенергетичні установки розглядаються як перспективне рішення для децентралізованого електропостачання. Завдяки здатності ефективно працювати в умовах турбулентних повітряних потоків вони добре пристосовані до експлуатації в міському середовищі. Це дозволяє встановлювати такі турбіни на відносно невеликих висотах, зокрема на дахах житлових, громадських і промислових будівель, що значно розширює можливості їх практичного використання.

Сучасні вертикально-осьові вітроенергетичні установки можна умовно поділити на дві основні групи залежно від принципу створення обертового моменту: турбіни Дар'є та турбіни Савоніуса. Турбіни Дар'є працюють переважно за рахунок аеродинамічної підйимальної сили, що виникає на профільованих лопатях, тоді як в основі роботи турбін Савоніуса лежить різниця сил аеродинамічного опору, які діють на окремі елементи ротора.

Турбіни Дар'є характеризуються використанням довгих вигнутих лопатей аеродинамічного профілю, які формують характерну просторову конструкцію ротора. Під час обертання лопаті постійно змінюють своє положення відносно напрямку вітрового потоку, внаслідок чого змінюється кут атаки та величина аеродинамічної підйимальної сили. Саме ця сила створює крутний момент, що забезпечує обертання ротора та перетворення енергії вітру на механічну енергію.

Завдяки використанню підйимальної сили турбіни Дар'є мають вищу швидкохідність і кращі енергетичні характеристики порівняно з опірними конструкціями. Водночас вони відзначаються складнішою конструкцією та, як правило, потребують додаткових технічних рішень для запуску ротора за низьких швидкостей вітру.

У процесі розвитку вертикально-осьових вітроенергетичних установок було створено низку модифікацій класичного ротора Дар'є. Однією з найбільш поширених конструкцій є турбіни з прямими вертикальними лопатями, відомі як Н-ротори або турбіни типу Н-Darrieus. Для таких установок характерне використання прямих аеродинамічних лопатей, закріплених на вертикальному валу за допомогою поперечних елементів. Прикладом реалізації цієї концепції є турбіна Windspire, призначена для використання в умовах міського середовища.

Подальший розвиток даного напрямку привів до появи вдосконалених конструкцій, запропонованих низкою спеціалізованих виробників вітроенергетичного обладнання. У таких розробках застосовуються модифіковані форми лопатей та оптимізовані геометричні параметри ротора, що сприяє покращенню аеродинамічних характеристик і підвищенню ефективності роботи установки.

Порівняння енергетичних показників свідчить, що за умов рівномірного та слабкотурбулентного повітряного потоку турбіни Дар'є зазвичай поступаються горизонтально-осьовим вітроенергетичним установкам за коефіцієнтом використання енергії вітру. Це пояснюється вищою аеродинамічною ефективністю горизонтально-осьових конструкцій, які сьогодні домінують у промисловій вітроенергетиці.

Водночас в умовах міської забудови, де повітряні потоки характеризуються значною турбулентністю та частими змінами напрямку, вертикально-осьові турбіни демонструють низку суттєвих переваг. Вони здатні ефективно працювати незалежно від напрямку вітру, краще адаптуються до складних аеродинамічних умов та забезпечують більш стабільні експлуатаційні характеристики. У певних локальних умовах, характерних для щільної міської забудови, сумарне виробництво електроенергії вертикально-осьовими турбінами може бути співставним або навіть перевищувати показники окремих горизонтально-осьових установок аналогічної потужності.

Серед вертикально-осьових вітроенергетичних установок найбільшого практичного поширення набули турбіни типу Дар'є, принцип роботи яких

ґрунтується на використанні аеродинамічної підйимальної сили. Саме цей тип конструкції став основою перших масштабних проєктів із впровадження вертикально-осьових вітротурбін у промислову енергетику.

Одним із піонерів у сфері комерційного використання таких установок була компанія FloWind, яка у 1980-х роках реалізувала низку проєктів із впровадження турбін Дар'є на території США. Найбільші групи цих вітроенергетичних установок були розміщені в районах перевалів Техачапі та Альтамонт у штаті Каліфорнія, що характеризуються сприятливими вітровими умовами та високим вітроенергетичним потенціалом.

До середини 1980-х років компанії вдалося створити парк вертикально-осьових вітротурбін сумарною встановленою потужністю близько 95 МВт. За сприятливих метеорологічних умов такі установки забезпечували значні обсяги виробництва електроенергії, а річний виробіток окремих комплексів досягав приблизно 100 млн кВт·год.

Хоча в подальшому основний розвиток світової вітроенергетики був пов'язаний переважно з горизонтально-осьовими турбінами, досвід експлуатації установок типу Дар'є став важливим етапом розвитку вертикально-осьових технологій та сприяв подальшому вдосконаленню конструкцій цього класу.

Однак тривала експлуатація вертикально-осьових вітроенергетичних установок типу Дар'є виявила низку суттєвих технічних проблем. Найбільш серйозними з них стали підвищені циклічні навантаження на конструктивні елементи ротора, що призводили до прискореного втомного зносу матеріалів, а також нижчі за очікувані показники виробництва електроенергії. У багатьох випадках фактичний коефіцієнт використання встановленої потужності виявився меншим за проєктні значення, що негативно позначилося на економічній ефективності таких установок.

Унаслідок технічних труднощів та недостатньої економічної доцільності більшість вітроенергетичних комплексів компанії FloWind поступово була виведена з експлуатації. До середини 1990-х років ці установки практично

повністю припинили роботу, поступившись місцем більш ефективним горизонтально-осьовим вітротурбінам.

Іншим поширеним різновидом вертикально-осьових вітроенергетичних установок є турбіни Савоніуса. Конструкція такого ротора складається з двох або більше напівциліндричних лопатей, зміщених одна відносно одної та закріплених на вертикальній осі обертання. У поперечному перерізі ротор має характерну S-подібну форму (рис. 2.7).

Принцип роботи ротора Савоніуса ґрунтується на використанні різниці аеродинамічного опору, що виникає на увігнутій та опуклій поверхнях лопатей. Увігнута сторона сприймає більший тиск повітряного потоку, тоді як на опуклій стороні опір є меншим. Унаслідок цього на різних сторонах ротора виникають неоднакові аеродинамічні сили, які створюють крутний момент і забезпечують його обертання.

Завдяки простоті конструкції, високому пусковому моменту та здатності працювати за низьких швидкостей вітру ротори Савоніуса широко застосовуються в автономних енергетичних системах малої потужності. Водночас через відносно низький коефіцієнт використання енергії вітру вони значно рідше використовуються для промислового виробництва електроенергії.



Рисунок 2.7. Ротор Savonius

Порівняно з горизонтально-осьовими вітроенергетичними установками та турбінами типу Дар'є, ротори Савоніуса працюють на значно менших швидкостях обертання, проте здатні створювати високий пусковий і робочий крутний момент. Саме ця особливість забезпечує їх надійний запуск навіть за невеликих швидкостей вітру та дозволяє використовувати такі установки в механічних системах, де необхідне значне тягове зусилля.

Одним із найвідоміших прикладів практичного використання принципу аеродинамічного опору є чашкові анемометри, які широко застосовуються для вимірювання швидкості вітрового потоку. Їх робота також базується на різниці сил опору, що виникають під час взаємодії повітряного потоку з елементами ротора.

Оскільки ротори Савоніуса використовують переважно силу аеродинамічного опору, їх швидкохідність і коефіцієнт використання енергії вітру є нижчими порівняно з турбінами, що працюють на основі підймальної сили. Унаслідок цього такі установки характеризуються меншими значеннями коефіцієнта корисної дії та поступаються за енергетичною ефективністю як горизонтально-осьовим турбінам, так і вертикально-осьовим установкам типу Дар'є.

Незважаючи на здатність стабільно працювати за низьких швидкостей вітру та забезпечувати високий пусковий момент, обмежена ефективність перетворення енергії стримує широке використання роторів Савоніуса для виробництва електроенергії. Тому їх застосування переважно зосереджене в автономних енергетичних системах малої потужності, вентиляційних установках, вимірювальних приладах та інших механічних пристроях, де визначальними є простота конструкції, надійність і впевнена робота за слабого вітру.

Водночас ротори Савоніуса характеризуються підвищеною матеріаломісткістю порівняно з турбінами Дар'є. За однакових габаритних розмірів вони потребують більшої кількості конструкційних матеріалів, що збільшує масу установки та витрати на її виготовлення. Крім того,

аеродинамічна ефективність таких турбін є помітно нижчою, оскільки принцип їх роботи базується на використанні сили опору, а не підйомної сили. Унаслідок цього коефіцієнт використання енергії вітру для роторів Савоніуса суттєво поступається показникам підйомних вертикально-осьових турбін типу Дар'є.

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до використання вертикально-осьових вітроенергетичних установок у міському середовищі. Це пов'язано з їх здатністю ефективно працювати в умовах складної аеродинамічної обстановки, що характеризується високою турбулентністю та частими змінами напрямку вітру. На відміну від традиційних горизонтально-осьових турбін, вертикально-осьові установки не потребують постійної орієнтації за напрямком повітряного потоку, що робить їх більш придатними для експлуатації в умовах щільної міської забудови.

Прикладом успішного впровадження таких технологій є діяльність британської компанії Quietrevolution, яка розробила серію вертикально-осьових вітротурбін qr5. Ці установки були спеціально адаптовані для використання в міському середовищі та інтегровані в архітектурний простір різних об'єктів інфраструктури Великої Британії. Досвід їх експлуатації підтвердив можливість ефективного використання вертикально-осьових вітроенергетичних установок для локального виробництва електроенергії в умовах урбанізованих територій.

Поряд із розвитком класичних вертикально-осьових вітроенергетичних установок активно вдосконалювалися й нові конструктивні рішення. Одним із прикладів таких розробок є діяльність компанії Aerotecture, яка спеціалізується на створенні вітротурбін із гібридною конструкцією ротора. Особливістю цих установок є поєднання принципів роботи турбін Дар'є та Савоніуса, що дозволяє одночасно використовувати переваги підйомної сили та високого пускового моменту.

Розроблені компанією конструкції пройшли випробування та були впроваджені на низці об'єктів інфраструктури США. Основу виробничої лінійки становили дві моделі: 610V із номінальною потужністю 1 кВт та 712V

потужністю 2,5 кВт. Максимальна ефективність роботи цих установок досягалася за швидкості вітру близько 14,2 м/с, що відповідало їх оптимальним експлуатаційним режимам.

Практичне використання таких вітроенергетичних систем здійснювалося на окремих об'єктах міської інфраструктури Чикаго, а також у Музеї імені Рендалла в Сан-Франциско. Досвід їх експлуатації продемонстрував можливість успішної інтеграції вертикально-осьових вітротурбін у міське середовище без суттєвого порушення архітектурного вигляду забудови.

Наведені приклади свідчать про зростаючий інтерес до використання вертикально-осьових вітроенергетичних установок у системах локального електропостачання. Поєднання компактності, незалежності від напрямку вітру та можливості гармонійного вписування в міський простір робить такі установки перспективним напрямом розвитку малої та розподіленої вітроенергетики.

3. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Вихідні данні

Дані про повторення швидкості вітру наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Повторюваність швидкості вітру

Місяць	Повторюваність швидкості вітру по градаціях у відносних одиницях v				
	< 2	2-3	3-5	5-7	8 и более
Січень	0,09	0,18	0,31	0,23	0,19
Лютий	0,09	0,2	0,29	0,25	0,17
Березень	0,11	0,25	0,3	0,19	0,15
Квітень	0,12	0,24	0,32	0,2	0,12
Травень	0,11	0,32	0,29	0,13	0,15
Червень	0,12	0,32	0,27	0,17	0,12
Липень	0,09	0,34	0,26	0,25	0,06
Серпень	0,15	0,24	0,24	0,31	0,06
Вересень	0,11	0,28	0,23	0,29	0,09
Жовтень	0,1	0,23	0,32	0,2	0,15
Листопад	0,09	0,21	0,32	0,22	0,16
Грудень	0,07	0,2	0,34	0,23	0,16

Визначення розрахункової швидкості вітру для роботи вітроенергетичної установки: $w_{\text{роб}} = 8 \text{ м/с}$.

Визначення мінімальної робочої швидкості вітру для вітроенергетичної установки: $w_{\text{min}} = 2 \text{ м/с}$.

Визначення коефіцієнта потужності вітроколеса: $C_p = 0,42$.

Визначення річної потреби в електричній енергії: $N_{\text{річ}} = 65200 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$

3.2 Визначення параметрів вітрового режиму

Середня швидкості вітру за місяць, м/с:

$$w_j = (2,5 \cdot v_{2-3j} + 4 \cdot v_{4-5j} + 6 \cdot v_{5-7j} + 8 \cdot v_{8j}) \text{ м/с,}$$

$$\text{Січень } w_j = (2,5 \cdot 0,18 + 4 \cdot 0,31 + 6 \cdot 0,23 + 8 \cdot 0,19) = 4,59 \text{ м/с,}$$

$$\text{Лютий } w_j = (2,5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,29 + 6 \cdot 0,25 + 8 \cdot 0,17) = 4,52 \text{ м/с,}$$

$$\text{Березень } w_j = (2,5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,3 + 6 \cdot 0,19 + 8 \cdot 0,15) = 4,17 \text{ м/с,}$$

$$\text{Квітень } w_j = (2,5 \cdot 0,24 + 4 \cdot 0,32 + 6 \cdot 0,2 + 8 \cdot 0,12) = 3,92 \text{ м/с,}$$

$$\text{Травень } w_j = (2,5 \cdot 0,32 + 4 \cdot 0,29 + 6 \cdot 0,13 + 8 \cdot 0,15) = 3,94 \text{ м/с,}$$

$$\text{Червень } w_j = (2,5 \cdot 0,32 + 4 \cdot 0,27 + 6 \cdot 0,17 + 8 \cdot 0,12) = 3,86 \text{ м/с,}$$

$$\text{Липень } w_j = (2,5 \cdot 0,34 + 4 \cdot 0,26 + 6 \cdot 0,25 + 8 \cdot 0,06) = 3,87 \text{ м/с,}$$

$$\text{Серпень } w_j = (2,5 \cdot 0,24 + 4 \cdot 0,24 + 6 \cdot 0,31 + 8 \cdot 0,06) = 3,9 \text{ м/с,}$$

$$\text{Вересень } w_j = (2,5 \cdot 0,28 + 4 \cdot 0,23 + 6 \cdot 0,29 + 8 \cdot 0,09) = 4,08 \text{ м/с,}$$

$$\text{Жовтень } w_j = (2,5 \cdot 0,23 + 4 \cdot 0,32 + 6 \cdot 0,2 + 8 \cdot 0,15) = 4,26 \text{ м/с,}$$

$$\text{Листопад } w_j = (2,5 \cdot 0,21 + 4 \cdot 0,32 + 6 \cdot 0,22 + 8 \cdot 0,16) = 4,41 \text{ м/с,}$$

$$\text{Грудень } w_j = (2,5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,34 + 6 \cdot 0,23 + 8 \cdot 0,16) = 4,52 \text{ м/с},$$

де v_{ij} – Частота повторення швидкості вітру в кожному інтервалі за місяць.

Середня швидкість вітру за рік, м/с:

$$w_p = \sum w_j / 12 .$$

$$w_p = (4,598 + 4,53 + 4,162 + 3,91 + 3,93 + 3,85 + 3,85 + 3,4 + 4,09 + 4,256 + 4,406 + 4,521) / 12 = 4,22 \text{ м/с}.$$

Час роботи установки за рік, діб / рік:

$$\tau_p = 365 - (31 v_{2-I} + 28 v_{2-II} + 31 v_{2-III} + 30 v_{2-IV} + 31 v_{2-V} + 30 v_{2-VI} + 31 v_{2-VII} + 31 v_{2-VIII} + 30 v_{2-IX} + 31 v_{2-X} + 30 v_{2-XI} + 31 v_{2-XII}),$$

$$\tau_p = 365 - (31 \cdot 0,09 + 28 \cdot 0,09 + 31 \cdot 0,11 + 30 \cdot 0,12 + 31 \cdot 0,11 + 30 \cdot 0,12 + 31 \cdot 0,09 + 31 \cdot 0,15 + 30 \cdot 0,11 + 31 \cdot 0,1 + 30 \cdot 0,09 + 31 \cdot 0,07) = 326,96 = 327 \text{ діб/рік},$$

де v_{2-j} — повторюваність вітру із швидкістю < 2 м/с за кожен місяць.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків швидкості вітру

Показник	Величина по місяцях												За рік w_p
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Середня швидкість вітру за місяць w_j	4,59	4,52	4,17	3,92	3,94	3,86	3,87	3,9	4,08	4,26	4,41	4,52	4,17

Для оцінки збільшення швидкості вітру від висоти(до 50 м) використаємо формулу

$$w_{j50} = w_j \cdot (H/H_0)^a,$$

$$\text{Січень: } 4,59 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,75 \text{ м/с,}$$

$$\text{Лютий: } 4,52 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,66 \text{ м/с,}$$

$$\text{Березень: } 4,165 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,22 \text{ м/с}$$

$$\text{Квітень: } 3,92 \cdot (50/10)^{0,14} = 4,91 \text{ м/с,}$$

$$\text{Травень: } 3,94 \cdot (50/10)^{0,14} = 4,94 \text{ м/с,}$$

$$\text{Липень: } 3,87 \cdot (50/10)^{0,14} = 4,85 \text{ м/с,}$$

$$\text{Серпень: } 3,9 \cdot (50/10)^{0,14} = 4,89 \text{ м/с,}$$

$$\text{Вересень: } 4,08 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,11 \text{ м/с}$$

$$\text{Жовтень: } 4,255 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,33 \text{ м/с,}$$

$$\text{Листопад: } 4,405 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,52 \text{ м/с,}$$

$$\text{Грудень: } 4,52 \cdot (50/10)^{0,14} = 5,66 \text{ м/с,}$$

где w_j — відомі середні значення швидкості вітру кожного місяця, м/с;

$H_0 = 10$ м — вихідна висота з відомою швидкістю вітру, м;

$H = 50$ м — запланована висота розташування ВЕУ, м;

W — визначена швидкість вітру на висоті H , м/с;

a — емпіричний показник ступеню ($a = 0,14$).

Середня швидкість вітру за рік на висоті H , м/с:

$$w_{p50}^{50} = w_j^{50} / 12 .$$

$$w_{p50} = (5,756 + 5,76 + 5,32 + 4,92 + 4,96 + 4,88 + 4,88 + 4,83 + 5,14 + 5,37 + 5,6 + 5,669) / 12 = 5,28 \text{ м/с.}$$

Таблиця 3.3 – Величина швидкості вітру на висоті 50 м

Показник	Величина по місяцях												За рік w_{50p}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Середня швидкість вітру на висоті H за місяць w_0^{j5} , м/с	5,76	5,76	5,32	4,92	4,96	4,88	4,88	4,83	5,14	5,37	5,6	5,69	5,28

3.3 Оцінка обсягів виробництва електричної енергії вітроенергетичною установкою

Необхідний обсяг електричної енергії, що має генеруватися вітроенергетичною установкою, визначається з урахуванням режиму її роботи та тривалості функціонування протягом року τ :

$$N_{\text{BEY}} = N_p \cdot \tau_p / 365,$$

$$N_{\text{BEY}} = N_p \cdot \tau_p / 365 = 65250 \cdot 3278 / 365 = 58\,438 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Визначення середньої потужності вітроенергетичної установки:

$$P_{\text{cp}} = N_{\text{BEY}} / (24 \cdot \tau_p \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \eta_p),$$

$$P_{\text{cp}} = 58\,438 / (24 \cdot 351 \cdot 0,95 \cdot 0,92) = 8,66 \text{ кВт},$$

де $\eta_{\Gamma} = 0,95$ – ККД електрогенератора;

$\eta_p = 0,92$ – ККД редуктора.

Визначення потужності вітрового потоку, кВт:

$$P_0 = P_{cp} / C_p,$$

$$P_0 = 8,52 / 0,42 = 20,29 \text{ кВт},$$

де $C_p = 0,42$ — коефіцієнт потужності вітроколеса.

Визначення діаметра вітроколеса визначається за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{8P_{cp}}{C_p \rho (w_p)^3 \pi \eta_r \eta_p}},$$

$$0,42 \cdot 1,23 \cdot 5,22^3 \cdot 3,14 \cdot 0,95$$

$$\cdot 0,92 = 18,38 \text{ м.}$$

$$D = \sqrt{\frac{8P_{cp}}{C_p \rho (w_p)^3 \pi \eta_r \eta_p}}$$

$$D =$$

Обираємо $D = 18,5 \text{ м.}$

Площа обдування вітроколеса:

$$A_{вк} = \pi D^2 / 4,$$

$$A_{\text{вк}} = \pi D^2/4 = 3,14 \cdot 18,52/4 = 265 \text{ м}^2.$$

Визначення встановленої потужності вітроенергетичної установки $w_{\text{роб}} = 8 \text{ м/с}$:

$$P_{\text{д}} = 0,5 \cdot \rho \cdot A_{\text{вк}} \cdot w_{\text{р}}^3 \cdot C_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{р}},$$

$$P_{\text{д}} = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 265 \cdot 8^3 \cdot 0,42 \cdot 0,95 \cdot 0,92 \cdot 10^{-3} = 30,63 \text{ кВт}.$$

Для подальших розрахунків обираємо вітроенергетичну установку Condor Air WES 380/50-30, технічні характеристики якої відповідають визначеним вимогам щодо потужності та умов експлуатації. Основні технічні параметри обраної установки наведено нижче:

Діаметр вітроколеса = 12,5 м.

Номінальна кількість обертів = 30-35 об/хв.

Номінальна потужність = 30 кВт.

Максимальна потужність = 33 кВт.

Початкова швидкість вітру = 2,5 м/с.

Номінальна швидкість вітру = 7,5 м/с.

Автоматичний захист від штормового вітру.

Має автоматичну орієнтацію за напрямом вітру.

Асинхронний тип генератору.

Напруга з генератора = 170-420 V.

Частота струму = 50 Гц.

Вага гондоли = 560 кг.

Гранична швидкість вітру = 35 м/с.

Трифазний безщітковий генератор 380 В з частотою 50 Гц.

Лопаті вітротурбіни виготовлені з армованого поліефіру, що забезпечує високу міцність конструкції та стійкість до атмосферних впливів. Завдяки відносно невеликій площі лопатей установка здатна ефективно працювати за високих швидкостей вітру. Частота обертання ротора становить 35–50 об/хв,

що забезпечує низький рівень шуму та плавну роботу вітроенергетичної установки.

Вітроенергетична установка оснащена системою ручного гальмування та автоматичним захистом від штормових і ураганних вітрів, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання за несприятливих погодних умов. Наявність зазначених систем дозволяє запобігати перевантаженню конструктивних елементів установки та підвищує її експлуатаційну надійність.

Важливою особливістю обраної моделі є ефективна система орієнтації за напрямком вітру. Автоматичне повертання гондоли забезпечує оптимальне положення ротора відносно повітряного потоку, що сприяє максимальному використанню енергії вітру та зменшує виникнення додаткових динамічних навантажень на елементи конструкції. Завдяки цьому підвищується ефективність роботи вітрогенератора та збільшується термін його експлуатації.

$$Q_{\text{BEY}} = N_{\text{BEY}} \cdot 3600,$$

$$Q_{\text{BЭУ}} = 58412 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 210\,283,2 \text{ МДж/год.}$$

Річна економія умовного палива:

$$B_{\text{y.t.}} = Q_{\text{BЭУ}} / (Q_{\text{y.п.}} \cdot \eta_{\text{ст}}),$$

$$B_{\text{y.п.}} = 210\,283,2 / (29,33 \cdot 0,35) = 20484 \text{ кг.у.п.} = 20,48 \text{ т.у.п.,}$$

де $Q_{\text{y.п.}} = 29,33 \text{ МДж/кг}$ — теплота згоряння умовного палива;

$\eta_{\text{ст}} = 0,35$ – ККД традиційної енергоустановки.

Річна економія природного газу:

$$B_{\text{пр.г.}} = B_{\text{y.t.}} \cdot Q_{\text{y.t.}} / Q_{\text{пр.г.}},$$

$$B_{\text{пр.г.}} = 20,48 \cdot 29,33 / 35,5 = 16,92 \text{ тис. м}^3/\text{год},$$

де $Q_{\text{пр.г}} = 35,5 \text{ МДж/м}^3$ — теплота згоряння природного газу.

Об'єм попередженої емісії вуглекислого газу:

$$V_{\text{уг}}^{\text{BEY}} = 0,5 \cdot N_{\text{BEY}},$$

$$V_{\text{уг}}^{\text{BEY}} = 0,5 \cdot 58412 = 29206 \text{ кг} = 29,21 \text{ т.}$$

3.4 Обґрунтування вибору елементів автономної системи електропостачання

Акумуляторна батарея використовується як накопичувач електричної енергії та забезпечує безперервне електроживлення споживачів у періоди відсутності або недостатньої генерації електроенергії вітроенергетичною установкою. Накопичена енергія дозволяє підтримувати стабільну роботу автономної системи електропостачання незалежно від поточних вітрових умов.

Контролер заряду-розряду призначений для керування процесами заряджання та розряджання акумуляторної батареї. Його основною функцією є захист акумуляторів від перезарядження та надмірного розряду, що сприяє підвищенню надійності роботи системи та подовженню терміну служби накопичувачів енергії.

Інвертор є електронним пристроєм, який здійснює перетворення постійного струму, що надходить від акумуляторної батареї або вітроенергетичної установки, у змінний струм із параметрами, необхідними для живлення електроприймачів.

Змінний струм є стандартним видом електричної енергії, який використовується для роботи побутового, комерційного та промислового електрообладнання. Тому застосування інвертора є обов'язковою умовою функціонування більшості автономних систем електропостачання.

Для забезпечення надійності електропостачання автономна система може додатково комплектуватися дизельним генератором, який виконує роль резервного джерела енергії. Загальна кількість годин роботи дизельного генератора визначається на основі енергетичного балансу системи та характеризує тривалість його експлуатації протягом розрахункового періоду в умовах недостатньої генерації електроенергії вітроенергетичною установкою:

$$\tau_{\text{дг}} = 365 - \tau_{\text{р}},$$

$$\tau_{\text{дг}} = 365 - 327 = 38 \text{ діб} = 912 \text{ год/рік}.$$

Фактична кількість годин роботи ДГ:

$$\tau_{\text{дг. факт.}} = \tau_{\text{дг}} \cdot K_{\text{вик дг}},$$

$$\tau_{\text{дг. факт.}} = 912 \cdot 0,8 = 729,6 \text{ год/рік},$$

де $K_{\text{вик дг}} = 0,8$ — коефіцієнт використання встановленої потужності ДГ (даний показник характеризує ступінь використання встановленої потужності дизельного генератора та визначається як відношення фактичного виробітку електричної енергії до максимально можливого виробітку за роботи генератора з номінальною потужністю протягом відповідного проміжку часу).

На рисунку 3.1. показано схему електричних з'єднань основних елементів автономної системи електропостачання на базі вітроенергетичної установки.



Рисунок 3.1. Загальна схема під'єднання вітроустановки

Кількість енергії, яка має надійти від ДГ:

$$N_{\text{дг}} = N_{\text{год}} - N_{\text{ВЕУ}},$$

$$N_{\text{дг}} = 65200 - 58412 = 6788 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Необхідна потужність ДГ:

$$P_{\text{дг}} = N_{\text{дг}} / (\tau_{\text{дг. факт.}} \cdot \eta_{\text{ак}}),$$

$$P_{\text{дг}} = 6788 / (729,6 \cdot 0,9) = 10,33 \text{ кВт},$$

де $\eta_{\text{ак}} = 0,9$ – Коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї враховує втрати електричної енергії під час процесів заряджання, зберігання та розряджання. Саме від акумуляторної батареї споживач отримує електроенергію у періоди проведення технічного обслуговування або ремонту дизельного генератора, а також у випадках тимчасової відсутності генерації електроенергії від основних джерел живлення.

Для забезпечення надійної роботи автономної системи електропостачання як резервне джерело енергії обрано дизель-генератор KIPOR KDE16STA номінальною потужністю 11,7 кВт. Даний агрегат характеризується високою надійністю, економічністю та здатністю забезпечувати стабільне електропостачання споживачів у разі недостатнього виробітку електроенергії вітроенергетичною установкою або під час аварійних режимів роботи системи.

Основні технічні характеристики дизельного генератора KIPOR KDE16STA наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Характеристика дизель-генератора KIPOR KDE16STA

Характеристика	Величина
Максимальна потужність	13 кВт
Номінальна потужність	11,7 кВт
Тип запуску	електростарт
Напруга	220 В
Витрата палива	4 л/год
Вид палива	Дизельне

Рекомендована кількість акумуляторних батарей — 40 шт. (12 В).

Рекомендована ємність АКБ – 200 А·год.

Визначимо потужність інвертора ($P_{\text{інв}}$) :

$$P_{\text{інв}} \geq 1,25 \cdot P_{\text{сум}} = 8000 \cdot 1,25 = 10000 \text{ Вт.},$$

Відповідно до виконаних розрахунків необхідної потужності інвертора ($P=10000$) Вт для автономної системи електропостачання обрано інвертор SMA Sunny Tripower 10000TL. Дана модель характеризується високою ефективністю перетворення електричної енергії та забезпечує надійну роботу системи в широкому діапазоні експлуатаційних умов.

Номінальна потужність навантаження інвертора становить 10 кВт, що повністю відповідає розрахунковим потребам системи електропостачання. Пристрій забезпечує формування змінної напруги 230/380 В із номінальною частотою 50 Гц, що відповідає стандартним параметрам електричних мереж та дозволяє підключати широкий спектр побутового і промислового обладнання.

Діапазон вхідної напруги постійного струму становить від 370 до 800 В, що забезпечує стабільну роботу інвертора при зміні параметрів джерел електроживлення та дозволяє ефективно інтегрувати його до складу автономної системи на базі вітроенергетичної установки.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Актуальність проблематики охорони праці зумовлена необхідністю забезпечення належного рівня безпеки виробничих процесів, збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності, а також впровадженням комплексу організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів.

Єдині правові та організаційні засади функціонування системи охорони праці в Україні визначаються Законом України «Про охорону праці».

До основних нормативно-правових актів у сфері охорони праці належать:

1. законодавчі акти;
2. підзаконні нормативно-правові акти;
3. нормативно-технічна документація.

Закон України «Про охорону праці», прийнятий 25 листопада 1992 року, встановлює базові положення щодо реалізації конституційних прав громадян на належні, безпечні та здорові умови праці. Він регламентує правові відносини між роботодавцями та працівниками з питань безпеки праці, виробничої гігієни та виробничого середовища. У 2000 році було створено спеціалізований орган державного нагляду у сфері охорони праці.

Основною метою системи охорони праці є зниження рівня виробничого травматизму та професійної захворюваності до мінімально можливого рівня при одночасному забезпеченні високої ефективності та ергономічності трудової діяльності.

4.1. Загальна характеристика об'єкта, що проектується

Об'єктом даного розділу дипломного проекту є питання охорони праці на стадії розробки автономної вітроенергетичної установки. Метою розрахунку є визначення основних розмірів та параметрів вітроенергетичної установки та її

компоновку. В обсяг роботи входить визначення основних параметрів вітроенергетичної установки.

На організм людини впливають різні фактори, джерелами яких є технологічні агрегати. Перелік потенційно шкідливих і небезпечних факторів, які негативно впливають на умови праці, наведений у таблиці 4.1., згідно ГОСТ 12.0.003-74 [11].

Таблиця 4.1. – Перелік шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Шкідливі та небезпечні фактори	Джерела виникнення
Висока електрична напруга (380, 220 В)	Щити керування
Шум	Вентилятори, дросельні органи
Освітлення	Виробниче приміщення

4.2 Промислова санітарія

Шкідливі речовини, що утворюються під час роботи обладнання із вказівкою гранично допустимих концентрацій згідно ГОСТ 12.1.007-88 ССБТ [14]

Таблиця 4.2 – - Характеристика шкідливих речовин, що утворюються у технологічному процесі

Перелік шкідливих викидів	ГДК робочої зони, мг/м ³	Токсикологічна характеристика
Пил нетоксичний	10	Роздратування дихальних шляхів

4.2.1 Метеорологічні умови

Параметри мікроклімату розглядають для приміщення пульту управління та технологічного цеху, де встановлюють об'єкт проектування, згідно ГОСТ 12.1.005.-88 ССБТ [15].

Таблиця 4.3 – Нормовані параметри мікроклімату у виробничих приміщеннях.

Період року	Категорія робіт по енерговитратах	Температура, °С	Вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Тяжка – III	13-19	75	0,4
Теплий	Тяжка – III	15-26	65	0,2-0,6

4.2.2 Виробниче освітлення

Робоче освітлення усередині приміщень транспортного кондиціонера по діючих нормах проектування виробничого висвітлення ДБН В.2.5-28-2006 [18] ставиться до IV й V розрядів зорових робіт.

Природне освітлення комбіноване, коефіцієнт природної освітленості по ДБН В.2.5-28-2006 становить 4%. Для штучного висвітлення передбачено використання світильників з люмінесцентними джерелами світла, місцеве освітлення забезпечується світильниками підвищеної надійності НОБ-150 з лампами накаливання НГ-51.

Передбачено також аварійне освітлення на пультах керування, площадках обслуговування промислового обладнання (ПО), у переходах. Не рідше 2 разів на місяць необхідно робити чищення світильників, перевірка рівня освітленості виробляється не рідше 1 рази в рік.

Таблиця 4.4- Характеристика виробничого освітлення

Назва приміщення	Характеристика зорової роботи	Розряд зорових робіт	Коефіцієнт природного освітлення	Штучне освітлення			
				Система освітлення	Джерела освітлення	Нормова на освітленість, лк	Тип світильників
Майданчик огляду ПО	Малої точності	V	1,4	Комбінована	Лампи ДРЛ, НГ 51	50	Люмінесцентні, НОБ150
Прибори автоматики	Середньої точності	IV	1,2	Комбінована	Лампи ДРЛ, НГ 51	150	Люмінесцентні, НОБ150

4.2.3 Шум і вібрація

Рівень шуму відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 [19] не повинен перевищувати 85 дБА.

Джерелом аеродинамічного шуму є вихрові процеси в потоці робітничого середовища, пов'язані з пульсацією тиску й роботою потужних повітряних компресорів. Так витрата дуття становить на піч близько 2000 м³/хв. Боротьба з такими шумами ведеться за рахунок поліпшення аеродинаміки. Джерелами механічного шуму є вентилятори, електродвигуни, елементах систем випарного охолодження. Для зменшення рівня механічних шумів передбачається використання прокладочних матеріалів і пружних вставок у з'єднаннях, щоб зменшити передачу коливань від одних частин повітроводу до інших, балансування обертових елементів. Передбачено установку електродвигунів на

фундамент і використання спеціальних кожухів. Заходи щодо зниження шуму наведені в таблиці 4.5

Таблиця 4.5 - Заходи щодо зниження шуму

Найменування джерела шуму	Рівень шуму, дба		Заходи щодо зниження шуму на робочих місцях
	Допустимий	Фактичний	
Електродвигуни	85	95–110	Привід компресора
Вентилятори	85	90	Повітреоохолоджувач, конденсатор

Крім спеціальних заходів щодо зниження шуму, викладених у таблиці, рекомендується використати також засоби індивідуального захисту.

Рівень вібрації в системі транспортного кондиціонера відповідно до ГОСТ 12.1.012-90 [20] не повинен перевищувати 92 Дб по віброшвидкості. Вібрація в цеху ставиться до категорії 3а – технологічна вібрація. Для зниження вібрації до припустимого рівня передбачається наявність на двигунах віброізоляції й установка гнучких вставок у комунікаціях і вузлах кріплення повітроводів при монтажі.

4.3 Заходи безпеки

ІТП, робітники та службовці повинні одержати у відділі техніки безпеки вступний інструктаж. Безпосередньо на робочому місці інструктаж проводить майстер або начальник ділянки. Навчання й перевірку знань по ТБ необхідно пройти протягом 6 – 10 днів. Не рідше чим через 6 місяців проводиться повторний інструктаж. Один раз у рік здійснюється перевірка знань з охорони праці всіх працівників.

Для кожного ПН складені посадові й технологічні інструкції з обслуговування, ремонту, техніки безпеки, попередженню й ліквідації аварій.

Приміщення цеху по ступені небезпеки поразки людини електричним струмом згідно ПУЕ-87 [22] відносяться до приміщень із підвищеною небезпекою. Для безпечної роботи з електроустаткуванням й електроустановками приймаються організаційні й технічні міри.

До організаційних заходів відносяться: оформлення роботи вбранням і розпорядженням, допуск до роботи, нагляд під час роботи. Весь електротехнічний персонал повинен пройти навчання безпечним методам роботи й перевірку знань кваліфікаційною комісією із присвоєнням кваліфікаційної групи.

Технічні заходи містять у собі: надійну ізоляцію струмоведучих частин і проводів, огороження струмоведучих частин, застосування зниженої напруги, пристрій захисного заземлення й занулення, захисні відключення, застосування засобів індивідуального захисту (діелектричні килимки, підставки, боти, каски, рукавички). Заземлення струмоведучих частин й елементів, які можуть перебувати під напругою в аварійних ситуаціях, виконується відповідно до ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ [23].

4.4 Протипожежна безпека

Пожежна безпека забезпечується мірами пожежної профілактики й активного пожежного захисту за ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ [24]. Категорія згідно НАПБ Б.03.002 – 2007[27]; вогнестійкість згідно ДБН В.1.1-7-2002 [26].

Пожежа може виникнути при коротких замиканнях і перевантаженні повітропроводів, при проведенні ремонтних робіт за допомогою газо- і електрозварювання.

Не менше одного разу в рік проводиться профілактичний ремонт парокомпресійної холодильної машини. В інструкції з охорони праці вказуються випадки аварійних ситуацій, при яких відключаються пристрої. Перелік протипожежних заходів наведений у табл. 4.6

Таблиця 4.6 – Протипожежні засоби

Найменування приміщення	Категорія приміщення	Площа	Вогнестійкість	Засоби пожежної сигналізації	Первинні засоби пожежогасіння	
					Найменування	Кількість, шт
Операторська	Г	15	11	Аварійна протипожежна сигналізація	Вогнегасник вуглекислотний ВВК-5, вогнегасник пінний, ящик з піском	4 3 1
Приміщення вентиляторної	Г	20	11	Те ж	Вогнегасник вуглекислотний ВВК-5	3

На електродвигунах з джерелом змінних частот та напруги мають бути встановлені засоби прямого контролю температури вбудованими датчиками для відключення в разі перевищення її граничного значення.

4.5 Захист навколишнього середовища

Основним законодавчим актом з охорони навколишнього середовища є Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" [28] та ряд законодавчих та нормативно-технічних документів.

Джерелом забруднення повітряного басейну є пило-газові викиди.

Очистка викидів становить собою звільнення від наявності в них шкідливих речовин з метою зниження їх концентрації до безпечних рівней.

Розрізняють наступні методи очистки стічних вод, газових викидів в атмосферу, переробки промислових відходів [29]:

1. Механічні-для очистки газів, які відводяться від твердих та рідких зважених речовин під дією сил тяжіння, інерції, відцентрових сил та явища змачування.

2. Хімічні (реагентні)- для перетворення газів, які містять шкідливі речовини в речовини з нешкідливими або з малотоксичними властивостями.

3. Фізичні- зміна фізичних властивостей шкідливих речовин шляхом впливу: випромінювання, електромагнітними полями.

4. Фізико-хімічні - пов'язані як з протіканням хімічних реакцій, так і зміною фізичних властивостей забруднюючих речовин.

5. Термічні - зпалювання газів, які відводяться, можливо навіть у наявності каталізаторів.

6. Біохімічні - використання мікроорганізмів для руйнування органічних речовин, які містяться в промислових відходах.

ВИСНОВКИ

Розглянуто питання походження вітру, його основні характеристики та особливості використання енергії вітру для виробництва електричної енергії. Проаналізовано чинники, що впливають на вітроенергетичний потенціал місцевості та ефективність роботи вітроенергетичних установок.

Проаналізовано основні типи вітроенергетичних установок, їх конструктивні особливості, принципи роботи та експлуатаційні характеристики. Розглянуто горизонтально-осьові та вертикально-осьові вітротурбіни, визначено їх переваги, недоліки та сфери застосування. Проведений аналіз дозволив оцінити вплив конструктивних і режимних параметрів на ефективність перетворення енергії вітру та обґрунтувати вибір оптимального типу вітроенергетичної установки для автономної системи електропостачання.

Представлено основні принципи та особливості розрахунку сучасних вітроенергетичних установок.

Виконано розрахунок ефективності застосування вітроенергетичної установки для електропостачання обладнання котельні. Визначено основні параметри системи, оцінено виробіток електричної енергії та підтверджено можливість використання вітроенергетичної установки для покриття частини або повного обсягу електричного навантаження споживача..

Проведено оцінку вітрового потенціалу місцевості та обґрунтовано вибір вітроенергетичної установки потужністю 250 кВт. Виконано розрахунок основних параметрів її роботи та визначено обсяги виробництва електричної енергії при різних швидкостях вітру, що дозволило оцінити ефективність використання установки в заданих умовах експлуатації.

Річний виробіток електричної енергії вітроенергетичною установкою становить 58 412 кВт·год, що підтверджує ефективність використання енергії вітру для електропостачання обладнання котельні та забезпечення роботи автономної енергетичної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Забарний Г.М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г.М. Забарний, А. В. Щурчков// – К.: ІТТФ, 2002. – С. 151 -159
3. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001), Wind energy. Handbook. / [West Sussex], England, 643 p.
4. Chiras D., (2010). Wind Power Basics. / [New Society Publishers], Gabriola Island, Canada. – 179 p.
5. Wind Power For Dummies (2009). [Published by Wiley Publishing], Inc. Indianapolis. – 387 p.
6. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру : Навч. посіб. / С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак. – Львів : "Магнолія 2006", 2025. – 182 с.
7. Соловей О. І., Лега Ю. Г., Розен В. П., Ситник О. О., Чернянський А. В., Курбака Г. В. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії : навчальний посібник. Черкаси : ЧДТУ, 2007. 490 с.
8. Розвиток вітроенергетики у світі з 2001 по 2014 рр. Центр досліджень енергетики. URL:
<https://eircenter.com/multimedia/infografika/2014/10/07/rozvitokvitroenergetiki-u-sviti-z-2001-po-2014-rr>
9. Матєєнко Ю. П., Вожаков Р. В. Аналіз балансової надійності електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії. Відновлювана енергетика. 2021. № 4(67). С. 18–24. DOI:
[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).18-24](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).18-24).
10. Дмитренко Л. В. Геліо- та вітроенергетичні ресурси. Клімат України. Київ, 2003. С. 267–279.
11. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних

джерел енергії України / Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П. и др // НАНУ: Інститут електродинаміки. – Київ, 2001. – 42 с.

12. Довгалюк О. С., Мельник М. В. Перспективи розвитку вітроенергетики в Україні // Відновлювальна енергетика. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 67-73

13. Ключников К. Є. Вітроелектричні установки: проектування, експлуатація та монтаж. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 150 с

14. Довідкова книга по техніці безпеки в енергетику (в 2-х книгах за редакцією П. А. Доліна) М. Енергія ,1978м-608с.

15. Охорона праці в електроустановках. Книга для Вузів за редакцією Князевського Б. А. 3-і видання, перероблене й доповнене. М. Енерговид , 1983м-336с.

16. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.92 № 2695-ХІІ (із змінами).

17. Березуцький В.В Основи охорони праці. –Харків: Факт, 2005.

18. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

19. Постанова КМ України від 01.08.1992 № 442 «Про порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці» (із змінами).

20. Правила улаштування електроустановок. 5-те вид. перероб. Й доп.-Х: 2016 р, Затв. Наказ Мін. Енергетики та вугільної промисловості України від 20.06.2014 р. №269.

21. НАПБ Б. 03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою. Наказ МНС від 03.12.2007 р. №6883.

22. ДБНВ 1.1-7-02. – Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва.

23. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.