Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

ННІ комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій і екології

ДИПЛОМНА РОБОТА

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНИМ РІВНЕМ «БАКАЛАВР»

"ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ВІТРОУСТАНОВОК В СИСТЕМІ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ"

Виконав студент 4 курсу
Група НФ-41
Олешко А.А.
Спеціальність
105 Прикладна фізика та наноматеріали

Керівник: доцент Кошельнік О.В.

Рецензент: доцент Чорна Н.А.

Харків 2022
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

ННІ комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних технологій та екології
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____
"____" _____2022 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
Олешко Антон Андрійович

1. Тема роботи Порівняльний аналіз роботи вітроустановок в системі гарячого водопостачання
Керівник роботи: Кошельнік Олександр Вадимович, доцент
затверджені наказом по університету від "__"_____2022 року № _____ __
2. Строк подання студентом роботи
3. Перелік питань, які потрібно розробити:
Потенціал використання енергії вітру.
Конструкція та класифікація вітроенергетичних вітроустановок.
Методика розрахунку вітроустановок.
Розрахунок вітроустановок для системи гарячого водопостачання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Аналіз енергетичного потенціалу вітру та ступінь його використання
2	Аналіз існуючих конструкцій вітроустановок та їх класифікація
3	Вивчення методики розрахунків вітроустановок
4	Проведення порівняльного аналізу роботи вітроустановок для системи гарячого водопостачання

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ А.А. Олешко

Керівник роботи _____ О.В. Кошельнік

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СКОРОЧЕННЯ

ВЕС — вітроелектростанція

ВЕУ — вітроенергетична установка

ДГ — дизельний генератор

HAWT — вітроустановки з горизонтальною віссю

VAWT — вітроустановки з вертикальною віссю

РЕФЕРАТ

Олешко Антон Андрійович «Порівняльний аналіз роботи вітроустановок в системі гарячого водопостачання» (випускна робота бакалавра). – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2022 - 55 с.

Метою роботи є ознайомитися з конструктивними особливостями різних вітрогенераторів та зробити порівняльний аналіз двох найрозповсюдженішіх вітрових установок, які можуть використовуватись у системі гарячого водопостачання.

Основними завданнями роботи є: аналіз сучасного стану вітроенергетики; вивчення технології отримання енергію з вітру та детальний розгляд різних вітрогенераторів; проведення розрахунку дослідження з метою вибору оптимального вітрогенератора для використання в системі гарячого водопостачання; проведення розрахунків установки при обраному режимі роботи; проведення аналізу на ефективність вітроустановок в різни пори року; визначення показників ефективності і рентабельності.

Дипломна робота містить: 55 сторінок, 16 рисунків, 11 таблиць, 13 джерел.

Ключові слова: вітрова енергетика, гаряче водопостачання, енергетичні вітроустановки.

ABSTRACT

Oleshko Anton Andreevich "Comparative analysis of wind turbines in the hot water supply system" (bachelor's thesis). - Kharkiv: V.N. Karazin KhNU., 2022 - 55 p.

The aim of the work is to get acquainted with the design features of different wind turbines and to make a comparative analysis of the two most common wind turbines that can be used in the hot water supply system.

The main objectives of the work are: analysis of the current state of wind energy; study of wind energy technology and detailed consideration of various wind turbines; calculation of the study in order to select the optimal wind turbine for use in the hot water supply system; carrying out calculations of installation at the chosen mode of work; analysis of the efficiency of wind turbines at different times of the year; determination of efficiency and profitability indicators.

Thesis contains: 55 pages, 16 figures, 11 tables, 13 sources.

Key words: wind energy, hot water supply, energy wind installations.

ЗМІСТ

Вступ **7**

Розділ 1. ПОТЕНЦІАЛ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ **8**

1.1 Вітер та його походження 8

1.2 Оцінка вітроенергетичного потенціалу 10

1.3 Сучасний стан використання енергії вітру 14

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ВІТРОУСТАНОВОК **20**

2.1 Класифікація вітроенергетичних систем 20

2.2 Основні види вітроустановок 25

2.2.1 Енергетичні вітроустановки з горизонтальною віссю 27

2.2.2 Енергетичні вітроустановки з вертикальною віссю 31

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВІТРОУСТАНОВОК **36**

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ВІТРОУСТАНОВОК ДЛЯ СИСТЕМИ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ **48**

ВИСНОВКИ **54**

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ **55**

ВСТУП

Одним із показників комфортності побутових умов людини є наявність гарячої води.

У зв'язку з тим, що рівень побуту у людей безперервно зростає, і все частіше населення для задоволення господарсько-побутових потреб у гарячій воді вдається до використання різних електричних водонагрівачів, для електропостачальних організацій постає проблема збільшення встановлених потужностей знижувальних трансформаторних підстанцій та пропускної спроможності ліній електропередач.

Останніми роками практично у всіх країнах світу нарощується вироблення електричної та теплової енергії шляхом використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – сонячної, вітрової, геотермальної, енергії малих річок, біомаси та ін. Це пов'язано з постійним подорожчанням та виснаженням традиційних енергоресурсів – нафти, газу , вугілля, що загострилися проблемами екології, необхідністю надійного та ефективного енергопостачання віддалених, важкодоступних та специфічних споживачів.

Саме тому для споживачів які не приєднані до мережі центрального водопостачання є актуальним питання використовування ВЕУ. ВЕУ може успішно доповнити недостатню потужність енергопостачання і бути додатковим або автономним джерелом енергії.

РОЗДІЛ 1. ПОТЕНЦІАЛ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

1.1 Вітер та його походження

Вітер - це просто повітря в русі. Зазвичай в метеорології, коли ми говоримо про вітер, нас хвилює горизонтальна швидкість і напрямок. Наприклад, якщо ви чуєте повідомлення про західний вітер зі швидкістю 15 км/год, це означає, що горизонтальні вітри будуть дути із заходу з такою швидкістю.

Високий і низький тиск позначаються лініями рівного тиску, які називаються ізобарами.

Хоча ми не можемо побачити рух повітря, ми можемо виміряти його рух силою, яку воно прикладає до об’єктів. Ми використовуємо флюгер, щоб вказати напрямок вітру, і анемометр для вимірювання швидкості вітру. Але навіть без цих інструментів ми можемо визначити напрямок.

Наприклад, прапор вказує на напрямок, протилежний вітру. Вітер дме листя, протилежне напрямку, з якого дме вітер. Літаки злітають і приземлятимуться в аеропортах за напрямком вітру.

Вертикальний напрямок руху вітру, як правило, дуже малий (за винятком грозових висхідних потоків) порівняно з горизонтальним компонентом, але дуже важливий для визначення щоденної погоди. Повітря, що піднімається, охолоджується, часто до насичення, і може призвести до хмар та опадів. Опускається повітря нагрівається, викликаючи випаровування хмар і, таким чином, гарну погоду.

Сила градієнта тиску поширюється від високого до низького тиску.

У системах високого тиску значення тиску повітря вздовж кожної ізобари збільшується до центру з кожною концентричною лінією. Для систем низького тиску вірно протилежне, оскільки кожна концентрична лінія в

напрямку до центру означає нижчий тиск. Ізобари можуть бути близько один до одного або далеко один від одного.

Чим ближче ізобари зближені, тим швидше змінюється тиск повітря. Ця зміна тиску повітря називається «градієнтом тиску». Градієнт тиску - це просто різниця в тиску між областями високого і низького тиску.

Швидкість вітру прямо пропорційна градієнту тиску, що означає, що зі збільшенням зміни тиску (тобто градієнтом тиску збільшується), швидкість вітру також збільшується в цьому місці.

Чому це відбувається? Щоб зрозуміти, ми повинні розуміти сили, які керують вітром. Є три сили, які змушують вітер рухатися так, як він рухається. Всі три сили працюють разом одночасно.

Сила градієнта тиску (Pgf) — це сила, яка намагається вирівняти різницю тиску. Це сила, яка змушує високий тиск штовхати повітря до низького тиску. Таким чином, повітря потік би від високого до низького тиску, якби на нього діяла тільки сила градієнта тиску.

Як діє сила Коріоліса на обертовому диску.

Однак через обертання Землі існує друга сила, сила Коріоліса, яка впливає на напрямок вітру. Названа на честь Густава-Гаспара Коріоліса, французького вченого, який математично описав її в 1835 році, ця сила змушує об’єкти в північній півкулі повертатися вправо, а об’єкти в південній півкулі – вліво.

Один із способів побачити цю силу в дії — побачити, що станеться, коли пряма лінія стає кривою. Уявіть Землю у вигляді вертушки, що обертається проти годинникової стрілки. Лінійка розміщена над поворотним столом, і олівець буде рухатися по прямій лінії від центру до краю, в той час як поворотний стіл обертається під ним. В результаті виходить крива лінія на поворотному столі.

Якщо дивитися з космосу, вітер рухається прямолінійно. Однак, якщо дивитися із Землі, повітря (а також інші предмети в польоті, такі як літаки та птахи) відхиляється вправо в північній півкулі. Поєднання цих двох сил

призведе до того, що вітер буде дути паралельно прямим ізобарам з високим тиском справа.

Так чому ж повітря виходить із максимумів на спади? Існує ще одна сила, яка називається тертям, яка є останньою складовою для визначення потоку вітру. Поверхня землі шорстка, і це не тільки сповільнює вітер, але також викликає розбіжні вітри з високих і збіжні вітри поблизу мінімумів.

Повітряний потік навколо максимумів і мінімумів.

Що відбувається зі збіжними вітрами біля мінімуму? Властивість, яка називається безперервністю маси, стверджує, що маса не може бути створена або знищена в даній області. Тому повітря не може «скупчуватися» в певному місці.

У міру підйому охолоджується. Коли повітря охолоджується, конденсація починає перевищувати випаровування, тому невидима пара конденсується, утворюючи хмари, а потім опади. Тому поблизу районів низького тиску часто буває погана погода.

А як щодо повітря, що розходиться біля високого? Оскільки повітря поширюється від висоти, повітря зверху має опускатися, щоб замінити його. Опускається повітря зігріває. Коли повітря нагрівається, випаровування починає перевищувати конденсацію, а це означає, що хмари мають тенденцію випаровуватися. Тому ясна погода часто асоціюється з високим тиском.

1.2 Оцінка вітроенергетичного потенціалу

Енергетичний потенціал вітру окреслюється як сумарна енергія вітру кожної місцевості певній висоті над земною поверхнею.

Енергія вітру характеризується швидкістю, яка є випадковою величиною у просторі та часі. Таким чином, вітроенергетичні характеристики є ймовірним описом випадкового процесу зміни вітроенергетичного потенціалу. В основі ймовірнісного підходу лежить дискретність тимчасового

процесу, що дозволяє вважати всі параметри, визначені в інтервалі дискретності, незалежними та постійними. Як інтервали часу стаціонарності зазвичай використовують годину, добу, сезон, рік.

Сукупність аерологічних та вітроенергетичних характеристик об'єднана у вітроенергетичному кадастрі регіону. Основними особливостями кадастру вітроенергетики є:

• середньорічна швидкість вітру, річний та добовий режими вітру;

• повторюваність швидкостей, типів та параметрів функцій розподілу швидкості вітру;

• вертикальний профіль середньої швидкості вітру;

• питома потужність та питома енергія вітру;

• джерела енергії вітру регіону.

Для отримання достовірних даних про середню швидкість вітру на території необхідно використати значні обсяги вимірювань протягом тривалого часу.

Середня річна швидкість вітру визначається як середнє арифметичне значення, отримане в результаті вимірювань швидкості через регулярні проміжки часу за певний період: день, місяць, рік і кілька років:

$$V_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} V_i ,$$

де V - швидкість вітру за період вимірювання. і - кількість періодів вимірювання.

Для чисельної оцінки швидкості розгону швидкості вітру за середнім значенням використовується коефіцієнт варіації середніх швидкостей, який визначається виразом

$$C_v = \frac{S_v}{V_{\text{ср}}},$$

де Sv - стандартне відхилення поточної швидкості вітру від середнього значення; Vср - середня швидкість вітру за досліджуваний період.

Середня швидкість вітру служить орієнтиром, що характеризує використання вітрових електростанцій на певній території. Критеріями є швидкість вітру, з якою сучасні вітряні турбіни починають обертатися і розвивати свою номінальну потужність.

Відомо, що швидкість вітру збільшується з віддаленням від поверхні, що знаходиться нижче, і повітряний потік стає більш стабільним. Ступінь збільшення швидкості вітру з висотою сильно залежить від шорсткості поверхні внизу. Для різних типів поверхонь висота шорсткості Z_0 може бути визначена як висота, на якій швидкість вітру дорівнює 0.

Значення Z_0 для різних типів поверхонь наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Значення Z_0 для різних типів поверхонь

Тип поверхні	Характеристика	Z_0, м
Рівна	Пляж, лід, снігові краєвиди	0,005
Відкрита	Низька трава, аеропорти, прибрані поля	0,03
Шорстка	Поля з високими культурами, дерева, ліси, сади	0,25
Дуже шорстка	Ліси, сади	0,5
Закрита	Села, околиці міст	1
Міста	Центри міст, відкриті ділянка у лісах	2

Ці значення шорсткості можна використовувати у формулі, яка відображає логарифмічну залежність швидкість вітру VH з висоти H.

$$V_H = V_ф Ln(H/Z_0)/Ln(H_ф/Z_0),$$

де Hf – висота стримера, яка приймається рівною 10 м; Vf - швидкість вітру біля серпантину.

Формулу можна використовувати в районах без великих пагорбів або інших серйозних перешкод на відстані 1-2 км від вітрової турбіни.

Важливим енергетичним показником «Повторення різних змін швидкості вітру» можна вважати відсоток часу, протягом якого спостерігалася деяка шкала швидкості вітру. Поступова відтворюваність швидкості вітру є тимчасовою властивістю швидкості вітру. Ця функція важлива в розрахунках вітрової енергії, що передбачають оцінку інтервалів роботи вітрових електростанцій при різних швидкостях вітру. У зв'язку з помітними змінами швидкості вітру в залежності від пір року, рекомендується вибрати місяць як інтервал відбору проб для формування вітру. Середній розподіл місячного потенціалу вітру потім визначається шляхом обробки даних щоденних спостережень з найближчої метеостанції.

Поступово обчислюючи розподіл швидкості вітру, можна розрахувати місячну продуктивність вітроелектростанції. Для цього необхідно змінити відсоткову повторюваність діапазону швидкості вітру на відповідний часовий інтервал. При цьому потужність вітрогенератора, що відповідає певній швидкості вітру, та час роботи ВЕС у цьому режимі дають змогу визначити кількість електроенергії на цей місяць при відповідній швидкості вітру. Загальна енергія, яку може виробляти даний тип вітрової електростанції за певний період, визначається як сума енергій, які відповідають кожній якості вітру:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=n}^{n} P_i T_i,$$

де Pi - середня швидкість вітру / номінальна потужність ВЕС; Ti - тривалість/масштаб швидкості вітру протягом місяця; n – кількість градацій швидкості вітру.

Як правило, в збірку входить вежа вітрогенератора із зазначеними конструктивними параметрами. В автономних вітрових електростанціях потужністю 100-200 кВт висота вежі зазвичай не перевищує 50 м. Таким

чином, вертикальний профіль вітру на висоті 20, 30, 40, 50 м дозволяє більш точно оцінити вітер. вітроенергетичний потенціал області.

Для оцінки напрямку переважаючого вітру будується флюгер, який являє собою векторну діаграму, на якій довжина променів, що виходять з центру діаграми в різних напрямках (у точках горизонту), пропорційна до частота. вітри в цьому напрямку.

При будівництві вітрової електростанції та підключенні її до ландшафту (крім рівнинної ділянки) слід враховувати напрямок вітру в обраному місці.

Отже, результат дослідження вітроенергетичного потенціалу передбачуваного розташування ВЕС виглядає так:

1. Визначте середньодобову, місячну та середньорічну швидкість вітру для спостережень за погодою протягом 5–10 років.

2. Обчисліть середньомісячну швидкість вітру, виходячи з орієнтовної висоти вежі вітрової турбіни.

3. Побудуйте вітрову електростанцію в зоні дослідження.

Набуті можливості вітроенергетики дозволяють вибрати вітроенергетичне обладнання для налаштування та підключення до сільської системи електропостачання.

1.3 Сучасний стан використання енергії вітру

Поновлювані джерела енергії сьогодні є першим вибором для сучасної енергосистеми. Вітер і сонячна енергія зараз конкурентоспроможні зі звичайними джерелами та мають високий відсоток інвестицій у відновлювані джерела енергії. Вартість вітрових турбін з 2009 року впала майже на ⅓. Кількість країн, які проводили аукціони з використання відновлюваних джерел енергії, зросла (з 6 у 2005 році до 67 країн у 2017 році) із дуже великим збільшенням глобальних інвестицій. Світова сукупна встановлена

потужність вітрової енергії склала понад 645 ГВт до першого кварталу 2019 року.

У цій роботі розглядаються останні розробки в технологіях перетворення вітрової енергії та обговорюються майбутні очікування. Морські вітряні турбіни є найбільш можливою технологією для майбутнього використання, і тому плавучі вітрові турбіни мають домінувати з більшими масштабами, які можуть досягати втричі більших, ніж нині. Це забезпечить понад 20% світового попиту в 2030 році.

Тут представлено кілька прикладів для кожного випадку та висвітлено технологічні аспекти, які підтримують кожну розробку. Найважливіші вдосконалення проектування також обговорюються з прогнозом майбутніх проектних очікувань, які вплинуть на програму виробництва енергії вітру.

В даний час відновлювані джерела енергії є першим вибором, який слід розглядати як альтернативну енергію, коли енергосистеми необхідно модернізувати та розвивати. 90% цих відновлюваних джерел енергії знаходяться у формі сонячної та вітрової енергії. Інвестиції в ці два джерела різко зросли і стали конкурентоспроможними зі звичайними джерелами електроенергії. Вартість вітроенергетичних систем постійно зростає. Це відбилося на вартості електроенергії. Наслідки, пов'язані зі зміною клімату, чинили великий тиск на уряди, щоб вони почали шукати альтернативи та сталий розвиток енергетики, що зменшить вуглецевий слід та викиди. У відповідь на це відбулося значне збільшення кількості аукціонів, проведених для цих систем, з 6 у 2005 році до більш ніж 67 у 2017 році. Інвестиції у відновлювані джерела енергії досягли понад 289 мільярдів доларів США, з яких 134,1 мільярда доларів США припадає на енергію вітру. Це перевищило інвестиції у викопне паливо. Кількість робочих місць у відновлюваних джерелах енергії в усьому світі значно зросла і досягла понад 11 мільйонів людей у 2018 році. Китай був найбільшим, за ним йдуть ЄС, Бразилія, США та Індія.

В останні роки різко зросли вітроелектростанції. Розвиток і вдосконалення систем вітрової генерації були на високому рівні та виявили інтерес у всьому світі. На рисунку 1.1 показана глобальна встановлена потужність вітрової енергії (МВт).

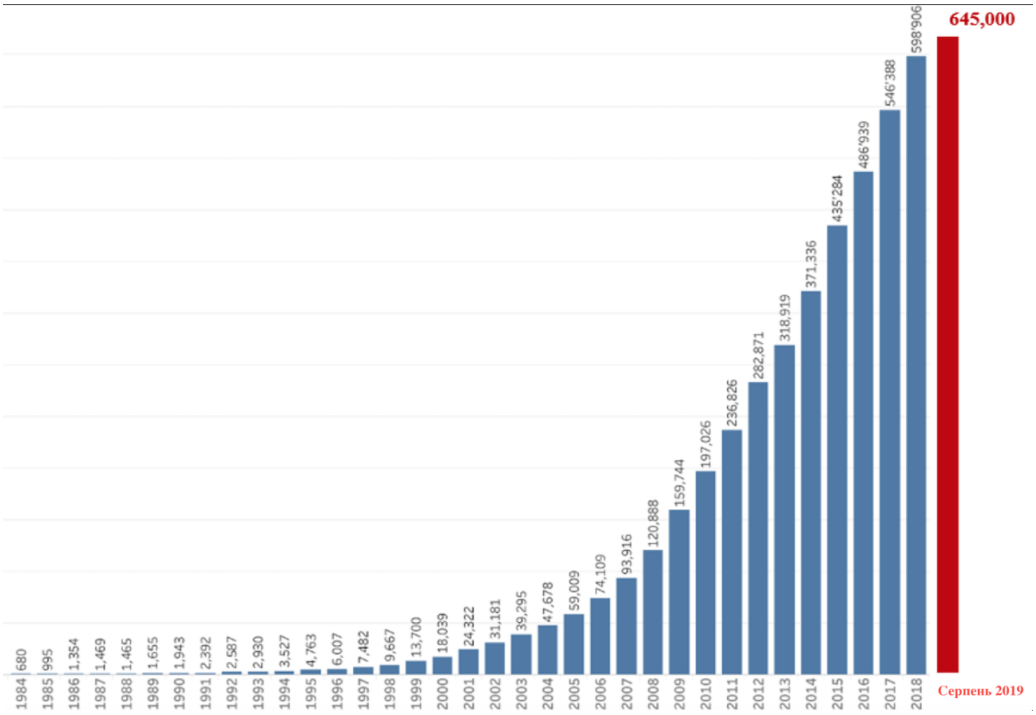


Рисунок 1.1. Глобальна встановлена потужність вітрової енергії (МВт)

Встановлено, що сукупна встановлена потужність вітроенергетики досягла 599 ГВт у 2018 році, а в 2019 році її було збільшено на 7 % до 645 ГВт.

Розвиток технологій, пов’язаних з вітровою енергетикою, має бути стійким, щоб підтримувати пом’якшення клімату, економічні вигоди та енергетичну безпеку. Вітрова енергетика має глобальний технічний потенціал, який у п’ять разів перевищує нинішнє світове виробництво енергії (тобто в сорок разів більше світового попиту на електроенергію за найкращого сценарію.

У цій роботі вона спрямована на сучасний стан відновлюваних джерел енергії та, зокрема, на розвиток вітрової енергетики, а також на майбутнє вітроенергетики з останніми технологічними досягненнями. Дослідження

покликане представити найперспективнішу технологію, тобто систему плавучої вітрини, як майбутню практичну систему для впровадження.

Енергетика вітру буде домінувати в зростанні енергетичного сектора

Глобальна рада з вітроенергетики окреслила різні сценарії, щоб припустити, що вітроенергетичні системи можуть забезпечувати 20% світового попиту на електроенергію до 2030 року. Оскільки цілі Паризької угоди передбачають повністю декарбонізоване постачання електроенергії до 2050 року, енергія вітру відіграватиме важливу роль у цій цілі.

2110 ГВт виробленої потужності може бути досягнуто до 2030 року, що буде еквівалентно 20% світових потреб. Очікується, що це створить понад 2,4 мільйона робочих місць із 3,3 мільярдами тонн викидів CO2 на рік. Протягом десяти років очікується інвестиція, яка досягне близько 200 мільярдів євро. Це має підкріплюватися багатьма ключовими факторами, такими як різке зниження ціни на вітроенергетичні системи, що покращує доцільність розгортання таких систем, що робить їх економічно конкурентоспроможними. Крім того, останні досягнення в цих технологіях і розвиток інтелектуальних мереж цілком можуть стати новими досягненнями для зберігання акумуляторів. Таким чином, посилення руху до зростання ринку електромобілів, а також громадського транспорту збільшує майбутній попит на електроенергію. Вітроенергетичні системи, швидше за все, здатні задовольнити цей попит на електроенергію, на рисунку 1.2 показано прогнозовану та очікувану сукупну вироблену потужність у 2030 році.

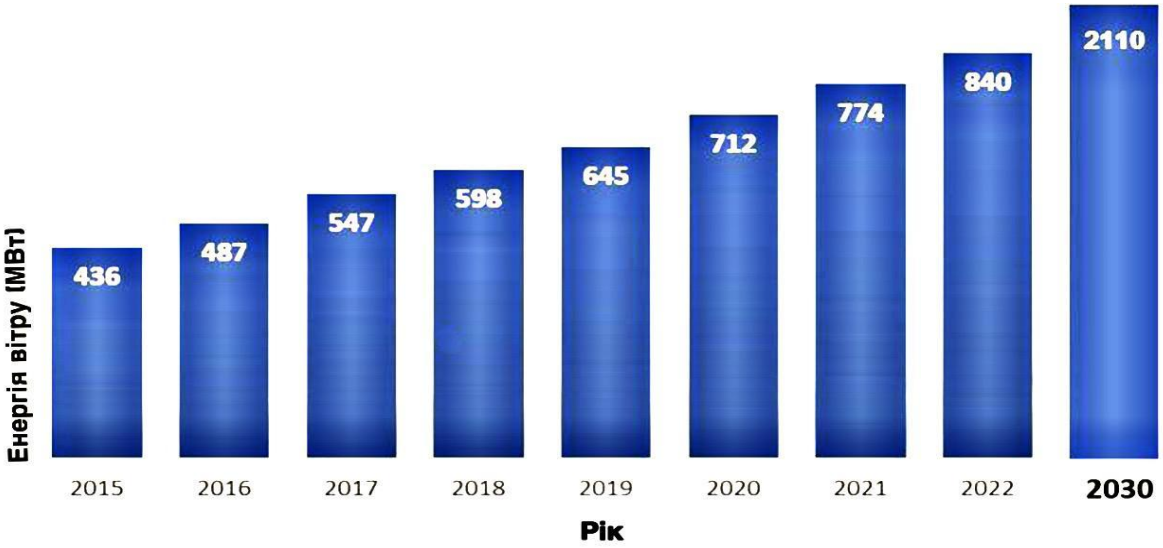


Рисунок 1.2. Світовий ринок вітроенергетичних систем

Світовий ринок вітроенергетичних систем у порівнянні з іншими відновлюваними джерелами енергії можна побачити на рисунку 1.3.

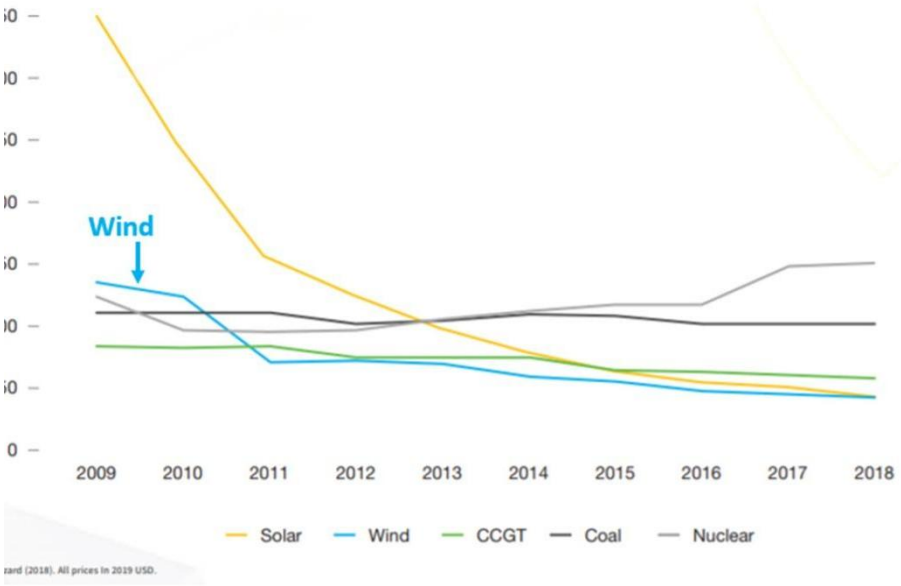


Рисунок 1.3. Світовий ринок вітроенергетичних систем у порівнянні з іншими відновлюваними джерелами енергії

З рис. 1.3 видно, що безперервна крутова крива зниження витрат. Витрати на виробництво сонячної та вітрової енергії значно нижчі, ніж на атомних, газових та вугільних електростанціях. 2018 рік продемонстрував значне збільшення кількості контрактів в обох джерелах. Особлива підтримка

міжнародних кредиторів останнім часом посилилася для країн, що розвиваються.

З цього дослідження було зроблено висновок, що при відповідних інвестиціях у відновлювані джерела енергії світ може досягти 100% виробництва чистої енергії до 2050 року. Оскільки вартість вітрових турбін з 2009 року впала майже на 1/3, вважається, що вітер має потенціал забезпечити 20% світового виробництва електроенергії в 2030 році, створивши 2,4 мільйона нових робочих місць і скоротивши викиди CO_2 більш ніж на 3,3 мільярда тонн на рік. У 2019 році світова потужність вітрової енергії досягла 645 ГВт. Якщо правильні інвестиції та передбачувана належна реалізація системи відновлюваної енергії, відновлювані джерела енергії та енергоефективність можуть забезпечити понад 90% скорочення викидів CO_2, пов'язаних з енергією. Морські вітряні турбіни – це моє бачення технології майбутнього, і плаваюча вітрова турбіна матиме серйозні перспективи.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ВІТРОУСТАНОВОК

2.1 Класифікація вітроенергетичних систем

Розрізняють три класи вітрогенераторів – залежно від відносної потужності вітрогенератора, підключеного до енергосистеми. Ці класи представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Класи вітрогенераторів

Клас	Потужність	Ступінь автономії ВЕУ	Методи керування
A	$P >> P_G$	Автономна	Кроком вітроколеса Навантаженням
B	$P = P_G$	Повітряно-дизельна	Роздільна робота ВЕУ та дизель-генераторів Спільна робота ВЕУ та дизель-генератора
C	$P << P_G$	Підключені до потужної енергосистеми	Параметрами генератора постійного струму Перетворенням постійного струму на змінний Зміною коефіцієнта ковзання

P – потужність ВЕУ; P_G - Потужність інших генераторів енергосистеми.

Клас А.

Важливе значення в енергосистемі має потужність вітрогенераторів, тобто $P>> P_G$.

Цей клас складається в основному з одногенераторних вітрових турбін, які є автономними і не підключені до жодної енергосистеми. Вони можуть не мати іншого джерела енергії або мати, наприклад, додаткову вітрову турбіну з меншою потужністю. Потужність таких вітрогенераторів, призначених для

використання у віддалених районах для освітлення, комунікацій тощо, зазвичай не перевищує 5 кВт. Якщо треба використовувати електроенергію, наприклад для опалення, то їх потужність може досягати 20 ... 50 кВт.

Ефективність і вартість вітрогенератора багато в чому залежить від правильного вибору системи керування генератором, як показано на рис. 2.1.

При оптимальному управлінні генератором напруга на його виході (і частота - у випадку генератора змінного струму) буде нестабільною.

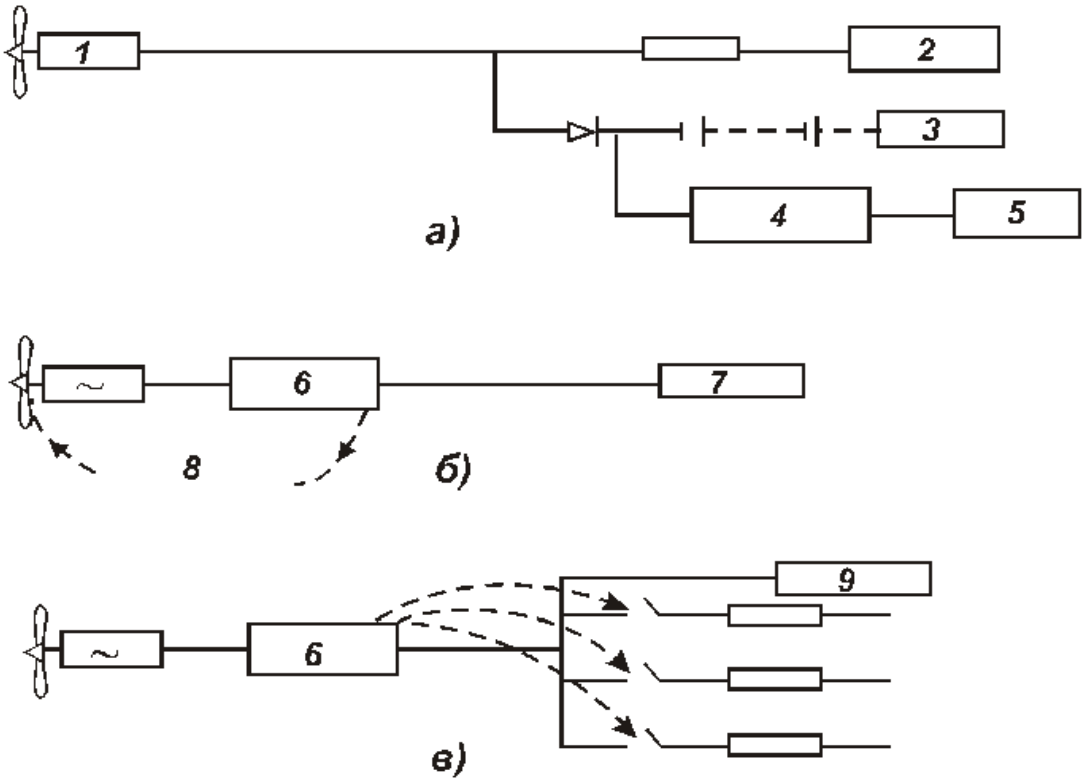


Рисунок 2.1. Можливі плани узгодження вітрогенераторів із замовниками: 1 - нестабільна напруга або частота; 2 - нагрівальний елемент; 3 - заряджений акумулятор; 4 - перетворювач DC-AC; 5 - стабілізована напруга і частота; 6 - регулятор; 7 - стабільний постійний струм; 8 - відповідник; 9 - перше навантаження

Електроніку з цими параметрами можна використовувати як безпосередньо для опалення будинків, так і для використання в додаткових випрямлячах.

Загалом, такі вітрогенератори повністю задовольняють клієнтів. Відносно низького споживання енергії можна досягти за допомогою

стабілізованих параметрів (наприклад 220 В / 50 Гц) за допомогою перемикачів, що живляться від батареї. Отримана таким чином енергія обмежена лише вартістю акумуляторів і перетворювачів.

У деяких випадках необхідно стабілізувати частоту всієї електроенергії, що виробляється генератором. Це можна зробити двома різними способами.

Перший. Механічний контроль радіусів вітрогенераторів для підтримки кутової швидкості обертання. За допомогою цього керування, змінюючи швидкість вітру, вітрогенератор (або кут удару) вітрогенератора змінюється на підтримку постійної швидкості. Недоліками цього методу є великі втрати енергії вітру, складність і низька надійність.

Другий. Електричний контроль, де безперервна швидкість вітрогенератора і генератора підтримується за рахунок зміни електричного заряду на виході генератора.

Використання сучасних електронних пристроїв робить його дешевшим і надійнішим за механічне керування.

В автономних вітрогенераторах використовуються різні генератори. Багатополюсні постійні магнітні генератори поширені в невеликому обладнанні (до 10 кВт). Генератори постійного струму можуть мати пристрої, які знімають існуючі струми, а енергія може використовуватися для зарядки акумулятора. Для виходу альтернативного струму широко використовуються синхронні генератори з стабільними і нестабільними вихідними параметрами. Іноді використовуються також асинхронні динамо-машини, які можуть бути незалежними або з генератором збудження.

Клас В.

Тут потужність вітрогенераторів така ж, як і потужність інших генераторів системи, тобто $P = P_G$.

Зазвичай генератором є дизельний генератор. І тут використання вітрогенераторів дає змогу економити паливо. Дизель-генератор можна використовувати тільки в погоду без вітру, а при слабому вітрі він може працювати паралельно з вітровим турбінам. Вітрова турбіна цього класу

використовує дві різні фази для розподілу виробленої енергії, які показані на малюнку нижче.

Одноканальна схема. У такій схемі, що має один вихід (зазвичай трьохфазної; побутові споживачі живляться від однієї фази), підтримується певне значення стабілізованої напруги — відповідно до потреб замовника (рис. 2.2, а). Цілодобове електропостачання вимагає тривалої (зазвичай не менше півдоби) роботи дизель-генератора у безвітряну погоду. Дизель також працює безперервно (особливо для освітлення) або тільки при дуже сильному вітрі. На практиці на такій схемі при сильному вітрі іноді більше 70% енергії від вітрогенераторів розподіляється на баластних балках.

Багатоканальна схема. Схема спрямована на те, щоб максимально використовувати вітер. Це досягається за рахунок зниження вартості електроенергії для деяких споживачів залежно від якості (рис. 2.2, б). У разі слабкого вітру споживачі дешевої електроенергії, виробленої вітрогенераторами, автоматично відмикаються, зменшуючи навантаження на мережу. Швидкість роботи генератора в такій системі можна регулювати одним із описаних вище способів, тоді він також буде стабільним джерелом живлення. У часи без вітру споживачі отримують електроенергію лише від дизель-генератора, який набагато дорожче вітрогенераторів. Перевагою такого плану розподілу енергії є максимальне використання енергії вітру в будь-який час.

Клас С.

Вітрогенератор підключений до електричної електричної системи, яка є набагато потужнішою, напр. $P << P_G$.

Це також стосується вітрогенераторів будь-якої потужності, що працюють у районах, де також працюють інші потужні системи (рис. 2.3). У зв'язку з цим енергія вітрогенераторів використовується безпосередньо і часто подається в енергосистему. Найдешевший і найбезпечніший вітрогенератор в даному випадку - це асинхронний генератор змінного току, який безпосередньо підключається до мережі. При цьому швидкість

обертання вітроколеса вітрогенератора не може перевищувати 10% частоти енергосистеми. При слабкому вітрі його слід відключити від електромережі, щоб вітрогенератор не працював у режимі електродвигуна. Встановлення швидкості вітрової турбіни, коли вітрогенератор безпосередньо підключений до мережі, не дозволяє вітрогенератору підтримувати фіксовану швидкість, тому в малих вітрогенераторах зазвичай використовуються два різних силові агрегати, наприклад, 5 і 30 кіловат, які автоматично відкриваються при слабкому і сильному вітрі.

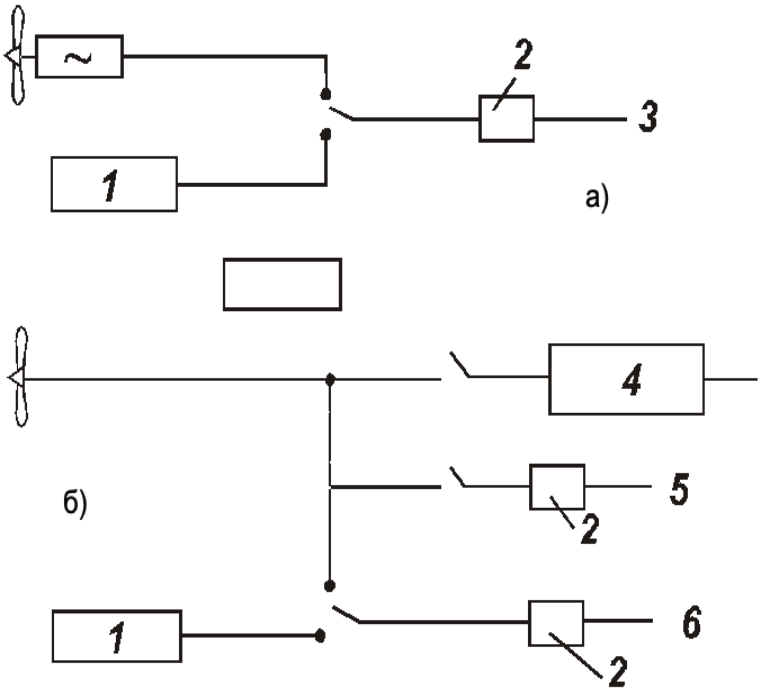


Рисунок 2.2. Одноканальні (а) і багатоканальні (б) системи координації роботи дизельних електростанцій і споживачів: 1 - дизель-генератор; 2 - лічильник; 3 - єдина вартість; 4 - енергозбереження; 5 - дешева електроенергія; 6 - дорога електроенергія

Також використовуються й інші прийоми, ось деякі з них, які мені здалися цікавими:

1. Збільшення кількості полюсів рахунок перекомутації його обмоток при зменшення частоти обертання вітрового колеса;

2. Випрямлення змінного струму вітрової турбіни, а потім перетворення його в змінний струм із заданими параметрами.

3. Збільшення допустимого відхилення в частоті обертання вітроколеса від номінальної за рахунок включення активного навантаження в обмотування асинхронного генератора.

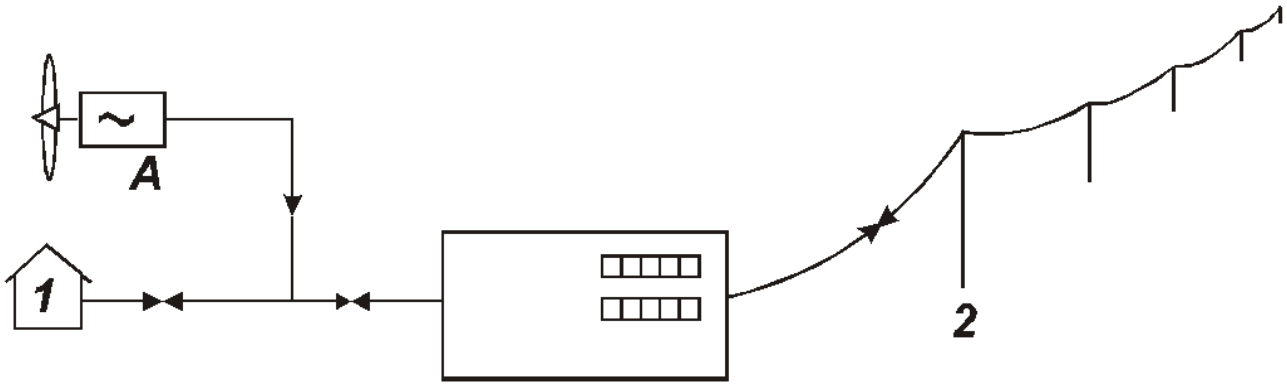


Рисунок 2.3. Схема приєднання ВЕУ до потужнішої енергосистеми:
1 – житлові будинки тощо; 2 – лінія електропередачі.

2.2 Основні види вітроустановок

Вітряні турбіни HAWT. «HAWT» — це вітряна турбіна з горизонтальним доступом.



Рисунок 2.4 Вітряні турбіни HAWT

Вітрові турбіни VAWT

Це типи вітрових турбін, які найбільш широко використовуються і зазвичай першими спадають на думку, коли ми думаємо про вітрову енергію. Ці турбіни можуть мати дві, але частіше три лопаті на вершині вежі висотою до 120 метрів. Довжина лопатей може досягати 60 м і виробляти до 20 МВт енергії.

«VAWT» — це вітряна турбіна з вертикальним доступом. Ці типи вітрових турбін використовують енергію вітру в протилежному напрямку, ніж HAWT. VAWT використовуються рідше, оскільки їх вертикальна конструкція не настільки ефективна чи продуктивна, як горизонтальна.



Рисунок 2.5 Вітрові турбіни VAWT

Загалом, конструкції HAWT виходять на перше місце завдяки високому виробництву енергії за найнижчої вартості. Хоча VAWT все ще корисні в менших масштабах, горизонтальний дизайн є найкращим варіантом для великомасштабного виробництва енергії вітру.

Щодня з’являються нові конструкції турбін. Зараз є навіть безлопаткові турбіни, яким потрібен лише вітер, щоб рухатися по конструкції, а не вітер для циркуляції конструкції. Вони навіть починають проектувати турбіни на основі того, як птахи літають, використовуючи природу пташиних крил, щоб навчитися краще використовувати енергію вітру, використовуючи менше матеріалу.

Той факт, що інженери знайшли спосіб використовувати вітер на

користь людини, вже вражає. Той факт, що щодня виходить все більше і більше дизайнів, є лише бонусом. Незабаром найбільш ефективні конструкції будуть вважатися нормою для виробництва енергії вітру.

2.2.1 Енергетичні вітроустановки з горизонтальною віссю

Вітряні турбіни з горизонтальною віссю можуть виробляти менше 100 кВт для базового застосування та житлового використання або до 6 МВт для виробництва електроенергії на морі.

Принцип роботи вітрової турбіни з горизонтальною віссю

Вітрогенератор з горизонтальною віссю (HAWT) — це вітряна турбіна, в якій вал головного ротора спрямований у напрямку вітру для отримання енергії. Основні компоненти базового HAWT показані на малюнку нижче.

Ротор отримує енергію від вітру і створює крутний момент на валу, що обертається. Низькошвидкісний вал передає енергію на коробку передач, високошвидкісний вал і генератор, які для захисту закріплені в гондолі.
Зверніть увагу, як лопаті з’єднані з ротором і валом. Цей вал називається низькошвидкісним валом, тому що вітер зазвичай обертає обертовий вузол зі швидкістю від 10 до 20 обертів на хвилину (об/хв).

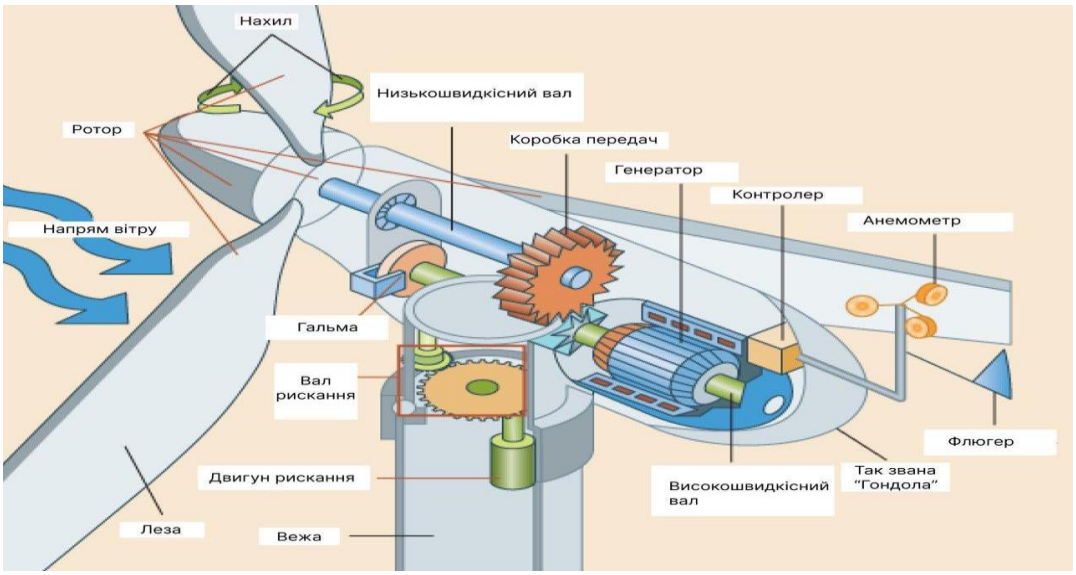


Рисунок 2.6. Основні частини вітрової турбіни з горизонтальною віссю

Низькошвидкісний вал з’єднується з коробкою передач, яка має набір передач, які збільшують вихідну швидкість валу приблизно до 1800 об/хв для вихідної частоти 60 Гц (або 1500 об/хв, якщо частота 50 Гц). З цієї причини вал від коробки передач називають швидкохідним валом.

Потім високошвидкісний вал підключається до генератора, який перетворює обертальний рух у змінну напругу. Ця швидкість є критичною, якщо вона використовується для безпосереднього обертання генератора, оскільки частота змінного струму від генератора безпосередньо пов’язана зі швидкістю, з якою він обертається.

Майже всі вітряні турбіни з горизонтальною віссю мають компоненти, подібні один до одного, але є деякі винятки. Наприклад, вітряні турбіни з прямим приводом не мають коробки передач, і вони зазвичай мають генератор постійного струму, а не генератор змінного струму. Вони можуть вмикати або не вмикати перетворювач у змінний струм (який може бути розташований біля основи вежі).

У комерційних турбінах контролером є комп’ютер або програмований логічний контролер (ПЛК). Контролер бере дані з анемометра, щоб визначити напрямок вітрової турбіни, як оптимізувати зібрану енергію або як запобігти перевищення швидкості у разі сильного вітру.

Крок і рискання можна регулювати так, щоб високошвидкісний вал працював з постійною швидкістю для отримання необхідної вихідної частоти (зазвичай 50 Гц або 60 Гц) від генератора.

HAWT також можуть використовувати коробку передач або набір передач, які змінюють повільне обертання лопатей на більш швидке обертання генератора.

Оптимальна швидкість обертання леза зазвичай становить від 10 до 20 об/хв, а передавальне відношення можна використовувати для того, щоб високошвидкісний вал обертався зі швидкістю, яку вимагає генератор.

Другий метод регулювання частоти полягає в тому, щоб дозволити турбіні вільно працювати на будь-якій швидкості, що знаходиться в межах її

номінальних показників, і передати напругу на силовий електронний перетворювач частоти. Цей метод також використовується для вітрових турбін з вертикальною віссю (VAWT).

Коли використовується перетворювач частоти, швидкість обертання турбіни не контролюється, поки не буде досягнуто максимальної швидкості, після чого переходить на контроль швидкості.

Інвертор приймає однофазний або трифазний змінний струм до своїх вхідних ланцюгів у заданому діапазоні частоти та рівня напруги.

Змінний струм фільтрується і перетворюється в постійний випрямлячем і згладжується за допомогою пасивних фільтрів, щоб видалити будь-які сліди вхідної частоти.

У наступній секції є інвертор, який перетворює напругу постійного струму назад в однофазну або трифазну напругу змінного струму з точною частотою та фазою, необхідними для мережі.

Перевага цього методу полягає в тому, що він має більш широкий діапазон робочих умов, не вимагаючи більш складної передачі.

Нижче представлена таблиця 2.2, де наведено порівняння різних типів повітряних турбін з горизонтальною віссю

Таблиця 2.2. Порівняння різних типів повітряних турбін з горизонтальною віссю

Тип повітряної турбіни	Переваги	Недоліки	Фото приклади
Трилопатева турбіна	1. Найтихіший з трьох типів турбін 2. Найменша кількість вібрації 3. Наявний контроль нахилу лопаті дозволяє лопаті вловити максимальну кількість вітру	1. Важча за одно- та дволопатеві турбіни 2. Найбільш капітальний з трьох видів 3. Потрібний активний контроль рискання, щоб лопаті були спрямовані проти вітру	

	4. Найнижча вартість енергії в порівнянні з іншими турбінами з лопатями аналогічного розміру	4. Для будівництва потрібні найбільші крани 5. Потрібна найбільша і найважча вежа 6. Більші лопаті важче транспортувати до місця вежі	
Дволопатева турбіна	1. Початкова вартість і вага нижчі, і їх простіше монтувати 2. Виробляє більше енергії, ніж однолопатева турбіна	1. Шумніше трьохлопатевої турбіни 2. Виробляє менше енергії, ніж трилопатева турбіна (коли розмір і швидкість лопаті однакові)	
Однолопатева турбіна	1. Найменша вартість 2. Найпростіша у зведенні завдяки своїй легкій вазі та тому, що лезо можна встановити, коли воно знаходиться на землі 3. Потрібна найменша і найлегша вежа	1. Шумніше трьохлопатевої турбіни 2. Повинен працювати на найвищій швидкості, щоб виробляти таку саму кількість електроенергії 3. Найбільш схильний до вібрації на лезі	

2.2.2 Енергетичні вітроустановки з вертикальною віссю

Вітротурбіни з вертикальною віссю бувають одного з двох основних типів: вітряна турбіна Дарріє і турбіна Савоніуса, яка використовує великі чашки з лопаткою.

У 1980-х і 1990-х роках вітряні турбіни з вертикальною віссю були випробувані та ширше використовувалися, оскільки вони були тихішими і могли працювати, не вимагаючи контролю повороту, незалежно від напрямку вітру.

Вітрова турбіна з вертикальною віссю (VAWT) — це вітряна турбіна, головнавісь обертання якої орієнтована у вертикальному напрямку.

VAWT були інноваційними конструкціями, які загалом не виявилися настільки ефективними, як HAWT, але вони мають кілька хороших характеристик, включаючи тиху роботу.

Оскільки вони не настільки ефективні, як HAWT, вони рідко використовуються у великих установках. Більшість VAWT є меншими установками, які можна розташувати в житлових і комерційних місцях, оскільки вони набагато тихіше, ніж турбіни з горизонтальною віссю.

Типи вітрових турбін з вертикальною віссю

Два типи вітрогенераторів з вертикальною віссю — це вітряна турбіна Дарріє, яка обертає вал за допомогою підйомної сили, і вітрова турбіна Савоніуса, чашки якої штовхаються під дією прямих сил вітру.

Вітряні турбіни з вертикальною віссю можуть виробляти електричну енергію на нижчих швидкостях і при різних швидкостях.Оскільки вони сильно відрізняються за швидкістю, генератори змінного струму, які вони використовують, не виробляють постійної потужності. Зазвичай вихід направляється на інвертор, який перетворює його в стандартний змінний струм (однофазний або трифазний). Інший варіант - використовувати DC як вихід.

У міських районах швидкість і напрями вітру часто змінюються, а швидкість вітру, як правило, нижча через будівлі та інші об’єкти, які створюють тіні від вітру.

Вітряні турбіни з вертикальною віссю можуть генерувати напругу при низьких швидкостях вітру, і їм не потрібно змінювати напрямок, щоб вловити корисний вітер.

Вітрова турбіна Дарріє з вертикальною віссю

На рис. 2.6 показаний типовий вітрогенератор Дарріє з вертикальною віссю. Зовнішній вигляд вітряної турбіни схожий на велику яйцезбивалку.

Лопатка встановлена на великому монополі, а генератор розташований у нижній частині лопаті. Верхня частина жердини має ряд відтяжних дротів, які утримують стовп на місці, коли сила вітру змушує лезо обертатися.

На рисунку 2.7 показані внутрішні частини вітрогенератора Дарріэ.



Рисунок 2.6 Вітрогенератор Дарріє

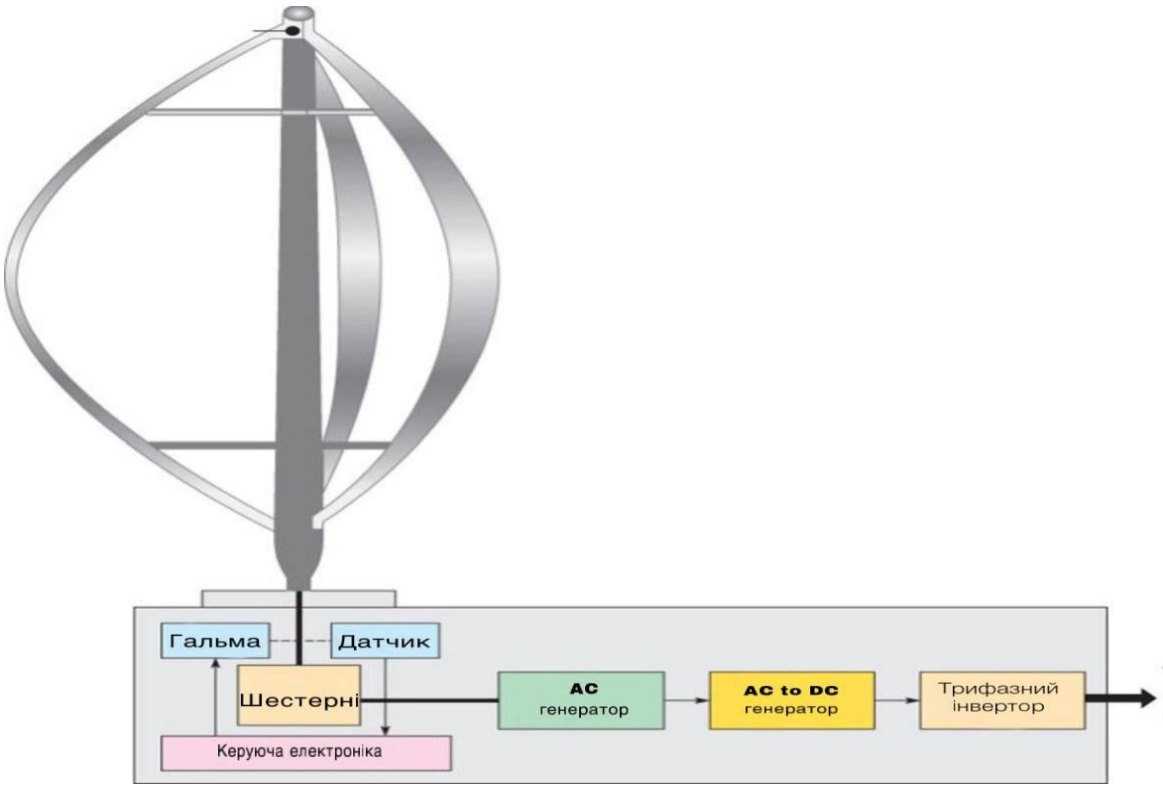


Рисунок 2.7. Внутрішні частини вітрової турбіни Дарріє

Коли лезо Дарріє працює, воно рухається по повітрю по круговому шляху. Потік повітря, що набігає, створює сумісну силу, спрямовану навскіс вперед і проектується всередину повз вісь турбіни на певну відстань, надаючи позитивний крутний момент валу. Це допомагає лезу обертатися в напрямку, в якому воно вже рухається.

Дія цієї лопаті подібна до аеродинамічних принципів, які використовуються у вертольотах, і це робить роботу вітрогенератора цього типу тихіше, ніж вітрогенератор з горизонтальною віссю того ж розміру.

Оскільки тертя на лопаті менше, лезо може обертатися з однаковим крутним моментом незалежно від напрямку вітру.

Проблема вітрової турбіни Darrieus полягає в тому, що вона не самозапускається, тому вона використовує свій генератор як двигун для запуску ротора. Коли вітер збільшує швидкість лопаті, живлення двигуна вимикається, і він починає працювати як генератор.

Вітряні турбіни Дарріє були встановлені на ранніх вітрових електростанціях, але більшість з них були виведені з використання в

комерційних цілях, оскільки вони не такі ефективні, як HAWT, і вони вимагають постійного обслуговування.

Вітрова турбіна Савоніуса з вертикальною віссю

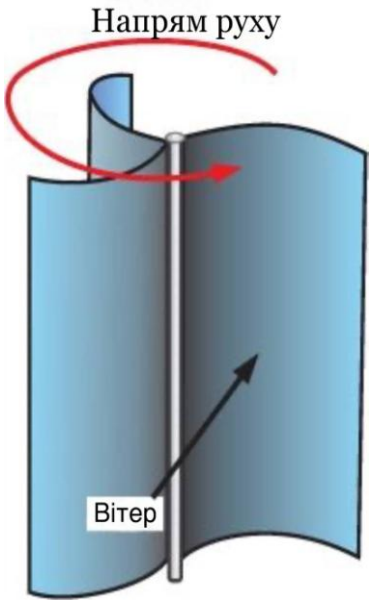


Рисунок 2.8. Вітрова турбіна Savonius з вертикальною віссю

Вітрова турбіна з вертикальною віссю використовує чашки, які називаються черпаками, замість лопатей для захоплення енергії вітру. На рисунку 2.8 показаний приклад вітряної турбіни Савоніуса з вертикальною віссю.

Коли дме вітер, він створює позитивну силу в совка і негативну силу на задній стороні черпака. Ця різниця в силі штовхає турбіну.

У типовій турбіні Савоніуса вітер надходить з передньої частини циліндра, викликаючи обертання. Однак вітер також вдаряє в спину інших совок, що сповільнює ротор.

Таблиця 2.3 Переваги та недоліки вітрогенераторів з вертикальною віссю

Переваги	Недоліки
Тиші й менш вібраційні, ніж вітрові турбіни з горизонтальною віссю	Для запуску вітрової турбіни Darrieus потрібні енергія і пусковий двигун
Не потребує регулювання повороту, оскільки він може виробляти електроенергію незалежно від напрямку вітру	Потрібні відтяжні дроти, щоб стовп залишався вертикальним, щоб обертання леза було плавним

Виробляє електричну енергію при дуже низьких швидкостях вітру	Не настільки ефективні, як вітрові турбіни з горизонтальною віссю
Повільніші швидкості леза, оскільки лопаті розташовані ближче до осі обертання	
Можуть встановлюватися в міських, житлових і комерційних районах, оскільки вони працюють з низьким рівнем шуму	
Приємніше для очей, ніж деякі більші горизонтальні вітрові турбіни; можуть бути покриті кольорами, щоб відповідати будівлям та навколишньому середовищу, оскільки менші турбіни встановлені низько до землі біля будівель	
Вежі з вертикальною віссю набагато коротші, ніж вітрові турбіни з горизонтальною віссю	
Генератор зазвичай монтують ближче до землі, тому для обслуговування не потрібен кран	

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВІТРОУСТАНОВОК

Потужність вітрового потоку визначається виразом:

$$P_0 = \tfrac{1}{2}\rho \cdot A_1 \cdot v_0^3 \cdot [Bm]$$

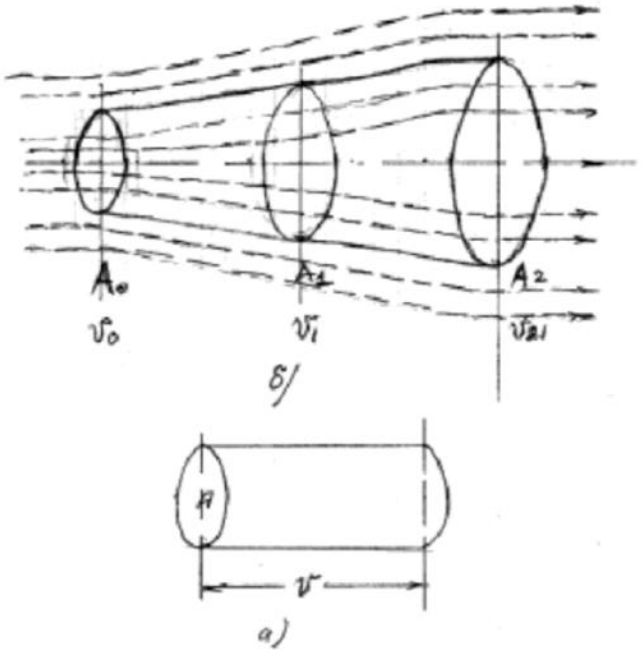


Рисунок 3.1 Схема до розрахунку потужності вітрового потоку (б) та модель взаємодії вітрового потоку та вітроколеса (а)

По теорії вітроколеса при вільному потоці, що проходить через вітроколесо з повітря не терпить розриву, а саме колесо замінюється тонким проникним диском при взаємодії з яким повітряний потік віддає йому частину енергії.

В наслідок чого тиск у потоці вітру зменшується і в ламінарий потік вносяться обурення, впливом яких у першому наближенні пренебрегають. Вказані на рис. 3.1 омітаема вітроколесом площа (A_1) і площади поперечних перерізів потоку до і після вітроколеса (A_1 і A_2) знаходяться за межами обуреної вітроколесом області, причому перетин A_2 знаходиться в місці найменшої швидкості потоку.

Діюча на ветроколесо сила F_1 дорівнює зміні кількості руху, що проходить через нього повітря масою m в одиницю часу, тобто:

$$F_1 = mv_0 - mv_2$$

Потужність вітроколеса, тобто, потужність, що розвивається цією силою, залежить від швидкості вітру в його перерізі і дорівнює:

$$P = F_1 \cdot v_1 = (v_0 - v_2)v_1$$

Але ця потужність за своєю сутністю є енергія, що втрачається вітровим потоком, що взаємодіє з вітроколесом в одиницю часу. Вона є різницею кінетичних енергій у перерізах A_0 та A_2 тобто:

$$P_w = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}m(v_0^2 - v_2^2)$$

Прирівнюючи і скоротивши “m”, отримуємо:

$$(v_0 - v_2)v_1 = \frac{1}{2}(v_0^2 - v_2^2) = \frac{1}{2}(v_0 - v_2)(v_0 + v_2)$$

Звідси:

$$v_1 = \frac{v_0 + v_2}{2}$$

Випливає дуже цікавий вивід: швидкість повітряного потоку в площині вітроколеса не може бути менше половини швидкості потоку, що набігає. Справді, якщо v_2 покласти рівної нулю, то v_1 буде рано $0.5v_0$. але так як v_2 нулю бути не може, то v_1 завжди більше $0.5v_0$. Маючи на увазі, що маса повітря, що проходить через переріз A_1 в одиницю часу, дорівнює:

$$m = \rho \cdot A_1 \cdot v_1$$

Тоді вираз для потужності вітроколеса має вигляд:

$$P = \rho \cdot A_1 \cdot v_1^2 (v_0 - v_2)$$

А після заміни v_2 отримуємо кінцеву формулу для потужності вітроколеса:

$$P = \rho \cdot A_1 \cdot v_1^2 \left[v_o - \left(2v_1 - v_0 \right) \right] = 2\rho A_1 (v_o - v_1) \cdot v_1^2$$

Вводиться поняття - коефіцієнт гальмування потоку “a” - як відносне (стосовно швидкості набігаючого потоку v_0) зменшення у вітроколесі швидкості потоку, що набігає, яке за визначенням дорівнює:

$$a = \frac{v_0 - v_1}{v_0}$$

Тоді:

$$v_1 = (1 - a) v_0$$

Враховуючи минулий вираз:

$$a = \frac{v_0 - v_2}{2v_0}$$

Коефіцієнт “a” називається також коефіцієнтом індукції чи коефіцієнтом обурення. У результаті наведених вище перетворень коефіцієнт може бути визначений експериментально, так як можливість вимірювання швидкостей v_0 і v_2 є об'єктивна, а в площині вітроколеса v_1 відсутня.

Підставляючи v_1 отримуємо вираз для потужності вітроколеса:

$$P = 2\rho \cdot A_1 \cdot (1-a)^2 \cdot v_0 \left[v_0 - (1-a)v_0\right] = 2\rho A_1 v_0^3 (1-a)^2 \cdot a =$$

$$= \frac{1}{2}\rho A_1 v_0^3 \cdot 4a(1-a)^2$$

Порівнюючи вирази отримуємо, що:

$$P = C_p \cdot P_0$$

$$C_p = 4a(1-a)^2,$$

Коефіцієнт ефективності використання потужності вітрового потоку або коефіцієнт потужності. Беручи похідну по “а” і прирівнюючи її до нуля, отримаємо, що максимальне значення C_p досягає при значенні:

$$a = \frac{1}{3}, \text{ а } C_{p\max} = \frac{16}{27} = 0{,}59259 \cong 0{,}593$$

Тобто у найліпшому разі на вітроустановці можна використовувати трохи більше половини потужності вітрового потоку. Це пояснюється тим, що повітряний потік повинен мати кінетичну енергію, щоб залишити околицю вітроколеса. Максимальне значення коефіцієнта C_p у зарубіжній літературі називається критерієм Бетца, проте незалежно від нього це значення було отримано Н.Є. Жуковським і справедливо його слід називати критерієм Бетца-Жуковського. Воно справедливе для будь-якої енергетичної установки, яка використовує енергію вільного потоку рідини або газу. Такі гідростанції називаються вільно потоковими. Для традиційних гідростанцій вода підводиться через напірний трубопровід і вираз для визначення потужності визначається напором і витратою води.

Залежність коефіцієнта C_p від коефіцієнта гальмування "а" представлена на рис. 3.6.

Іноді в технічних даних на вітроустановку наводиться значення коефіцієнта корисної дії що істотно перевищує критерій Бетца-Жуковського. Очевидно, в цьому випадку мається на увазі відношення фактичної потужності ВЕУ до теоретично можливої, яка може бути визначена за виразом:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{вэу}^{факт}}{P_{вэу}^{расч}} = \frac{C_p^{факт} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{эл} \cdot P_0}{C_p^{расч} \cdot P_0} = \frac{C_p^{факт} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{эл}}{C_p^{расч}}$$

Де $\eta_{мех}$ – ККД механічної передачі потужності від вітроколеса до генератора; $\eta_{ел}$ – ККД генератора і електричної системи перетворення;

$^{розр}C_p$ – розрахунковий коефіцієнт потужності;

$^{факт}C_p$ – фактичний коефіцієнт потужності.

Як відомо, течія нестискаємої ідеальної рідини описується рівнянням Бернуллі. Приймаючи це рівняння за основу, визначаємо навантаження, яке відчувається вітроколесом. Це навантаження виникає внаслідок різниці тисків Δр в потоці, що набігає, безпосередньо до і після вітроколеса. яке, як і раніше, вважаємо непроникним диском з площею A_1 (рис. 3.7).

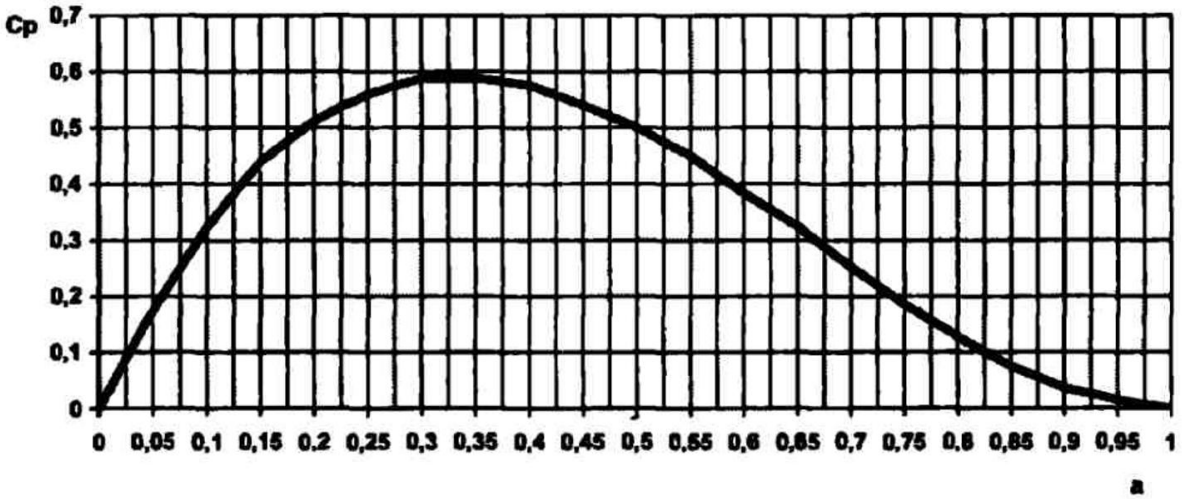


Рисунок 3.6. Залежність коефіцієнта потужності (C_p) від коефіцієнта гальмування потоку (а)

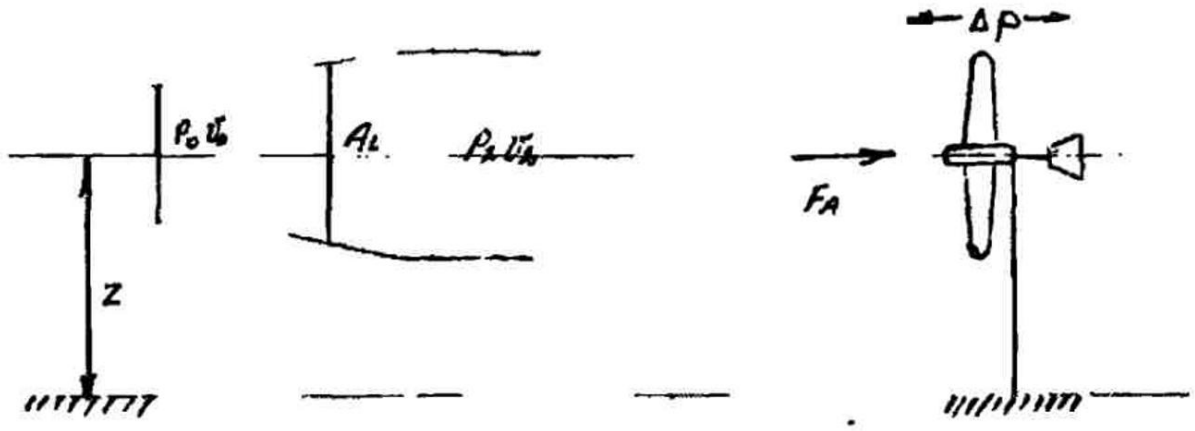


Рисунок 3.7. Визначення лобового тиску

Маємо, у відповідності з рівнянням Бернуллі що встановлює постійність тиску і швидкості, для нашого випадку запишемо:

$$\frac{P_0}{\rho_0} + g \cdot z_1 + \frac{v_0^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + g \cdot z_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

Зміна значення висоти “z” і щільності повітря “ρ” незначні в порівнянні з основними величинами тому можна записати:

$$\Delta P = P_0 - P_2 = \frac{(v_0^2 - v_2^2) \cdot \rho}{2}$$

Тут Δp – перепад статичного тиску на диску, $\frac{\square v\text{^}2}{2}$ – динамічний тиск. Максимальний перепад тиску буде у випадку, якщо $v_2 = 0$, тобто

$$\Delta P_{макс} = \frac{\rho v_0^2}{2},$$

А максимальне осьове навантаження що діє на вітроколесо дорівнює:

$$F_{Амакс} = \frac{\rho A_1 \cdot v_0^2}{2}$$

В горизонтально-осьових ВЄУ ня сила діє на осі вітроколеса і має назву фронтового тиску. З іншої сторони, сила, що діє на вітроколесо, може бути виміряна через зміну кількості руху набігаючого потоку, тобто сила дорівнює:

$$F_A = m(v_0 - v_2)$$

Підставляючи в формулу маси, значення швидкостей в площині вітроколеса v_1 і значення коефіцієнта гальмування потоку, отримуємо: ($v_0 - v_2$) = $2av_0$;

$$F_A = \rho \cdot A_1 \cdot v_1(2av_0) = \rho A_1(1-a)v_0 \cdot 2v_0 \cdot a = \frac{\rho A_1 v_0^-}{2} \cdot 4a(1-a)$$

$$F_A = \frac{C_F \cdot \rho A_1 \cdot v_0^2}{2}$$

Це означає, що, якщо значення $\frac{\rho A v_0^2}{2}$ можемо уявити як силу, що на непроникний диск, площею A_1, то сила, що діє на вітроколесо помножується на коефіцієнт C_1, що називається коефіцієнтом лобового тиску і дорівнює:

$$C_F = 4a(1-a)$$

Його найбільше значення, що дорівнює 1, досягається при а = $\frac{1}{2}$, що відповідає значенню швидкості $v_2 = 0$.

Як показано вище, найбільше значення $C_p = \frac{16}{27}$, (критерій Бетца-Жуковського) досягається при а = $\frac{1}{3}$, то йому відповідає значення $C_f = \frac{8}{9}$.

Через завихрення потоку на краях поверхні, що зметається, коефіцієнт С, непроникного диску, який представлено на моделі вітроколеса. насправді перевищує одиницю і дорівнює приблизно 1.2. Це говорить на користь теорії уявлення вітроколеса непроникним диском і визначає модель вітроколеса, що обтікає незбурним потоком в проміжках між лопатями. Особливо неспроможне таке уявлення вітроколеса при його роботі в зоні максимального значення $C_г$, коли вітроколесо чинить максимальний опір вітровому потоку.

Вітрове навантаження на вітроколесо зростає пропорційно квадрату швидкості набігаючого потоку, тому на сучасних ВЕУ середньої та великої потужності примусово обмежують робочу швидкість вітроколеса на величину 20-25м/с. Це здійснюється шляхом повороту лопатей в неробоче становище, вітроколесо зупиняється і сила лобового тиску різко падає, так як вітроколесо стає "прозорим" для вітру У вітроустановках дуже малої, і малої потужності при максимальній робочій швидкості вітру використовується принцип "уходу" з-під вітру в горизонтальній або вертикальній площині, завдяки чому вони автоматично зупиняються.

Вітроустановки, що використовують силу лобового спротиву Як було показано вище, такими вітроустановками є ВЕУ з вертикальною віссю. У загальному вигляді схему роботи таких вітроустановок можна представити у вигляді платівки площею А, що переміщається зі швидкістю v під дією швидкості вітру v_0. Припускаючи, що при зворотному русі пластина

складається і не чинить опору, то найбільша сила лобового опору F_{max} дорівнює:

$$F_{max} = \frac{\rho A(v_0 - v)^2}{2}$$

В реальних умовах сила лобового спротиву (F_p) відрізняється від (F_{max}). Ця відмінність враховується коефіцієнтом C_d, тоді:

$$F_p = \frac{C_D \cdot \rho \cdot A(v_0 - v)^2}{2}$$

Енергія, що передається платівці за одиницю часу, тобто, потужність вертикально-осьової ВЕУ дорівнює:

$$P_p = F_p \cdot v = \frac{C_D \cdot \rho \cdot A \cdot (v_0 - v)^2 \cdot v}{2}$$

Досліджуючи на максимум визначаємо, що максимальне значення (P_p) досягається при $v = \frac{v_0}{3}$ і дорівнює:

$$P_{p\max} = \frac{4}{27} \cdot C_D \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot v_0^3}{2}$$

З іншої сторони потужність вертикально-осьової ВЕУ через потужність вітрового потоку визначається відомим виразом: $P_p = C_p \times P_0$, а

$$P_{P\max} = C_{P\max} \cdot P_0 = \frac{C_{P\max} \cdot \rho \cdot A \cdot v_0^3}{2}$$

Прирівнюючи отримуємо:

$$C_{P\max} = \frac{4}{27} C_D$$

Значення коефіцієнта лобового супротиву C_d залежить від форми обтічного тіла і змінюється від нуля до 1.5, що має місце для увігнутих чашок анемометра. Відповідний максимальному значенню C_d коефіцієнт потужності C_d дорівнює:

$$C_{P\max} = \frac{4}{27} \cdot 1{,}5 = \frac{6}{27} = 0{,}22$$

Маючи на увазі, що максимальне значення коефіцієнта потужності C_p горизонтально-осьових ВЕУ дорівнює C_{pmax} = 0,595 (критерій Бетца-Жуковського), констатуємо наступний висновок.

При однаковому перерізі набігаючого потоку у вітроколіс, що використовують силу опору, значення коефіцієнта потужності майже втричі нижче, ніж у вітроколіс, що використовують підйомну силу. Ця відмінність

ще більше зростає якщо враховувати опір лопатей (чашок) що повертаються проти вітру.

Підвищити ККД вдалося в деяких модифікаціях вітроколеса Савоніуса шляхом поєднання сил опору та підйомної сили.

Швидкохідність. Це поняття визначає ефективність роботи вітроколеса. Розглянемо два крайні режими, неефективність яких зрозуміла на якісному рівні. Перший, коли лопаті вітроколеса розташовані дуже часто, чи вітроколесо обертається дуже швидко, що кожна лопатка обертається в турбульозованому потоці, обуреному попередніми лопатями. В результаті вітроколесо "перемелює" повітря та віддача від нього мінімальна. Другий крайній випадок, коли лопаті розташовані дуже рідко, або колесо обертається так повільно, що значна частина потоку проходить через поперечний переріз вітроколеса не взаємодіючи з його лопатями. Звідси випливає, що для досягнення максимальної ефективності, частота обертання вітроколеса що має певну кількість лопатей, повинна якось відповідати швидкості вітру. Розглянемо співвідношення що визначають це співвідношення.

Ефективність роботи вітроколеса, отже, визначається відношенням двох характерних проміжків часу: Δt_n , за яке лопать переміщується на відстань, що дорівнює відстані між лопатями; і Δt_b, за котрий обурення повітряного потоку, що створюється лопатями, переміститься на відстань що дорівнює його довжині. Проміжок часу Δt_b залежіть від розміру та профілю лопатей і змінюється зворотньо-пропорційно швидкості вітру.

Проміжок часу Δt_n для *n*-лопатевого вітроколеса, що обертається з кутовою швидкістю , дорівнює:

$$\Delta t_n \approx \frac{2\pi}{n\omega}$$

Нагадаю, що кутова швидкість визначається за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot N}{60}$$

де N – це швидкість обертання вітроколеса, об/хв. Проміжок часу існування в площині вітроколеса збурення, що створюється лопатями приблизно дорівнює:

$$\Delta t_e \approx \frac{d}{v_0}$$

де $_0$ – швидкість набігаючого потоку повітря;

d – характерна довжина збудженої лопатями ділянки повітряного потоку; Очевидно, що ефективність використання енергії повітряного потоку буде максимальною, якщо $\Delta t_n = \Delta t_b$, маємо:

$$\frac{2\pi}{n\omega} = \frac{d}{v_0}, \text{ или } \frac{n\omega}{v_0} = \frac{2\pi}{d}$$

За визначенням, коефіцієнт швидкохідності дорівнює: $Z = \frac{R \times \omega}{v_0}$.

Помножуючи обидві частини на радіус вітроколеса R отримуємо умову що визначає максимальну ефективність його роботи:

$$\frac{n \cdot \omega \cdot R}{v_0} = \frac{2\pi R}{d}, \text{ або } \frac{\omega \cdot R}{v_0} = \frac{2\pi \cdot R}{d \cdot n}; Z = \frac{2\pi \cdot R}{d \cdot n}, \text{ або}$$

$$Z = \frac{2\pi}{n}\frac{R}{d}$$

Довжину обуреної лопаттю зони можна уявити залежною від радіуса вітроколеса, висловивши цю залежність коефіцієнтом "К", тобто d ≈ k × R. Тоді формула оптимальної швидкохідності дорівнює:

$$Z_0 = \frac{2\pi}{Kn}$$

З практики відомо, що К ≈ $\frac{1}{2}$, тоді оптимальна швидкохідність дорівнює:

$$Z \approx \frac{4\pi}{n}$$

Ці вирази через наближення не зовсім точні, проте вони дають гарне орієнтування для вибору швидкості обертання вітроколеса.

На рис.3.8 представлені залежності коефіцієнта ефективності використання потужності вітрового потоку C_p від швидкохідності вітроколеса Z, для різних вітроколіс.

Умовою максимально можливого "знімання" енергії вітру є підтримання C_p в зоні найбільшого значення, тобто, необхідно забезпечити більш-менш постійне значення швидкохідності. Відповідно, при зменшенні швидкості вітру ($□_0$) необхідно знизити число оборотів вітроколеса (□) і навпаки. Ось чому більшість сучасних вітрогенераторів віддають перевагу змінній швидкості обертання вітроколеса, в досить широкому діапазоні.

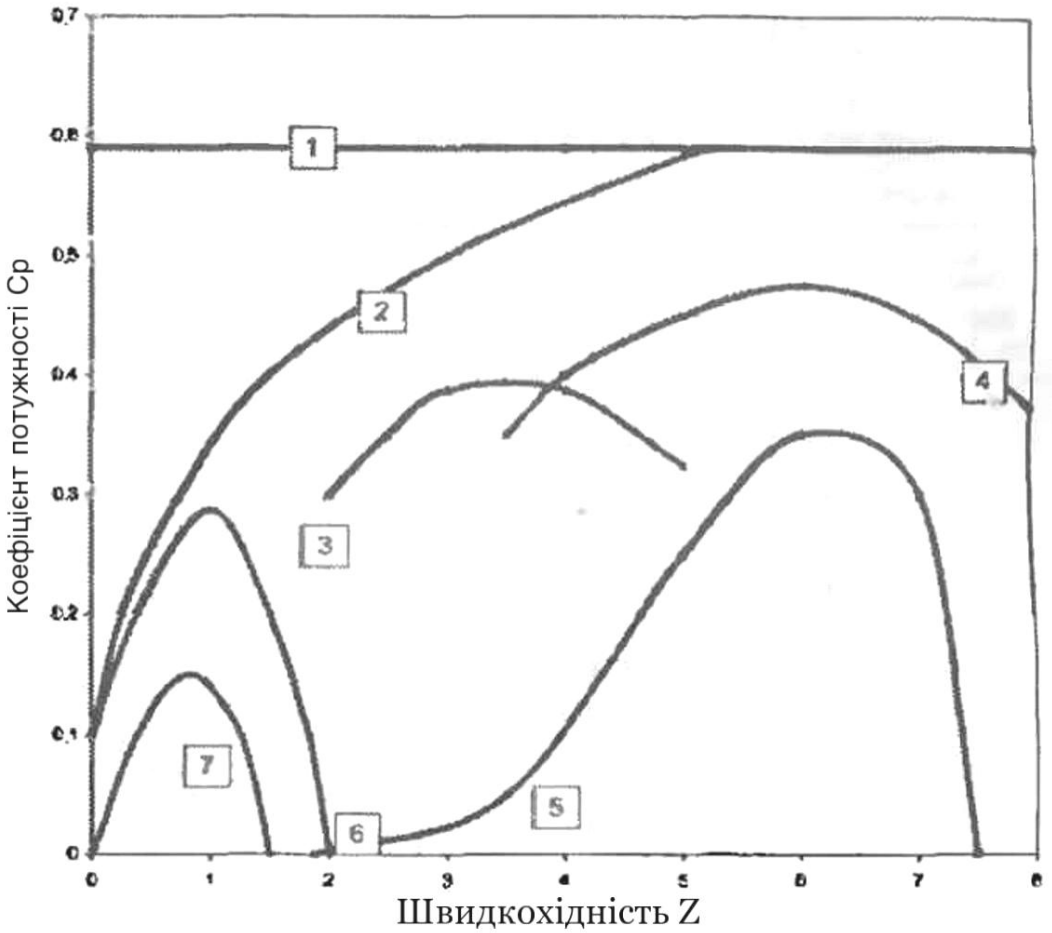


Рисунок 3.8 Залежність коефіцієнта потужності C_p від швидкохідності Z

Так ВЕУ Enercon E82 (потужність 2000 кВт. діаметр ротора 82 м) діапазон швидкості обертанні вітроколеса становить 6-19.9 м/с, тобто максимум більше мінімуму в 3 з лишком рази, а Enercon E112 (потужність – 4500 кВт, ротора - 114 м) діапазон швидкості обертання вітроколеса становив: 8-13 м/с.

До речі, умова сталості швидкохідності в конкретних конструкціях ВЕУ здійснює за допомогою підтримки сталості кута □. рівного сумі кутів: кута атаки (□) до (□) - кута установки лопаті (кут заклинювання). Кут атаки - це кут між вектором швидкості вітру щодо лопаті і хордою перерізу лопаті. А кут установки лопаті - кут між хордою перерізу лопаті до вектора, перпендикулярним вектору швидкості в площині вітроколеса. Разом з критерієм Бетца-Жуковського, Глауер-Том досліджено ідеальний пропелер і виведено залежність між максимальним значенням C_p та швидкохідності, представлена на рис.3.8.

Так, вертикально-осьові вітроустановки типу Савоніуса мають максимальне значення C_p = 15%, що в 4 рази менше критерію Бетца-Жуковського. По рис. 3.8 C_{pmax} трилопатевого вітроколеса не перевищує 40%.

Проте C_p сучасних 3-х лопатевих вітроколіс практично вже досягло 45%. Це свідчить про відносність максимальних значень зазначених на рис. 3.8, отриманих при суттєвих спрощеннях процесів.

У висновку зазначу, що швидкохідність вітроколеса є найважливішим його параметром, що визначає основні конструктивні рішення у вітроустановки.

Вона залежить від трьох основних величин: діаметра вітроколеса, швидкості обертання вітроколеса та швидкості вітру. Міркування щодо ефективності використання енергії вітру працюють у діапазоні збільшення швидкості вітру від стартової до номінальної. При підвищенні швидкості вітру від номінального значення починає діяти фактор обмеження потужності і вітроколесо примусово вводиться в режим зниження C_p. Характеристика ВЕУ представляється як прямої, паралельної осі абсцис, тобто потужність ВЕУ залишається постійною, хоча швидкість вітру збільшується.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ВІТРОУСТАНОВОК ДЛЯ СИСТЕМИ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Задача: вибрати необхідну кількість вітроустановок АВЕУ6-М та WE8000 для гарячого водопостачання. Необхідна кількість енергії для підігріву води $Q_н$ = 1600 МДж. Надлишкова енергія продається за «зеленим» тарифом.

Технічні характеристики АВЕУ-6-4М.

Діаметр вітроколеса, D = 6,6 м.

Розрахункова швидкість вітру, за якої забезпечується віддача номінальної потужності генератора, $V_р$ = 9 м/с.

Діапазон робочих швидкостей вітру, v_{min} … v_{max} = 4...40 м/с.

Номінальна потужність встановленого генератора $P_н$ = 4 кВт.

Технічні характеристики WE8000

Діаметр вітроколеса, D = 6,7 м.

Розрахункова швидкість вітру, за якої забезпечується віддача номінальної потужності генератора, $V_р$ = 10 м/с.

Діапазон робочих швидкостей вітру, v_{min} … v_{max} = 2...40 м/с

Номінальна потужність встановленого генератора $P_н$ = 8 кВт.

Дані про повторюваність швидкості вітру заносимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Повторюваність швидкості вітру

Місяць	Повторюваність швидкості вітру за градаціями у відносних одиницях				
	2-3	4-5	6-7	8-9	10 і більше
Травень	0,29	0,27	0,14	0,07	0,04
Червень	0,33	0,27	0,13	0,06	0,03
Липень	0,41	0,25	0,09	0,03	0,01
Серпень	0,37	0,26	0,1	0,05	0,01

Сума менше ніж 1, так як в решту часу вітру немає або швидкість менше 2 м/с.

Визначаємо кількість питомої енергії, що виробляється для кожного місяця за висловом, МДж/м^2.

$$W_{уд}^{м} = 3{,}6 \cdot \beta \cdot \mathrm{T} \cdot \left(\sum_{v_{min}}^{v_p} v_i^3 \cdot t_{vi} + v_p^3 \cdot \sum_{v_p}^{v_{max}} t_{vi} \right)$$

де Т - число годин на місяці; v_i – середня швидкість у діапазоні (остання швидкість у формулі завжди v_p)

$$\beta = 0{,}5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot \eta_г \cdot \eta_{ред} \cdot 10^{-3},$$

ρ – густина повітря (1,23 кг/м^3);

C_p = 0,37 - коефіцієнт потужності (використання енергії вітру);

$\eta_г$ = 0,9- ККД генератора;

$\eta_{ред}$ = 0,9 - ККД підвищувачого редуктора.

10^{-3} - коеф. переводу кДж в МДж.

Наприклад, у травні очікуване питоме вироблення енергії від вітроустановки АВЕУ6-4М:

$W_{уд} = 3{,}6 \cdot 0{,}184 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 31\ (4{,}5^3 \cdot 0{,}27 + 6{,}5^3 \cdot 0{,}14 + 8{,}5^3 \cdot 0{,}07 + 9^3 \cdot 0{,}04) = 66{,}62$ МДж/м^2.

Червень 56,76

Липень 36,08

Серпень 43,93.

Повне вироблення

$$Q_{веу} = W_{уд} \cdot \pi D^2 / 4 = 2278 \text{ МДж}.$$

Для вітроустановки WE8000:

$$W_{пит} = 3{,}6 \cdot 0{,}184 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 31\ (0{,}29 \cdot 2{,}5^3 + 4{,}5^3 \cdot 0{,}27 + 6{,}5^3 \cdot 0{,}14 + 8{,}5^3 \cdot 0{,}07 + 10^3 \cdot 0{,}04) = 74{,}2 \text{ МДж/м}^2.$$

Червень 63,1

Липень 40,57

Серпень 48,12

Повне вироблення

$$Q_{веу} = W_{пит} \cdot \pi D^2 / 4 = 2614 \text{ МДж}.$$

Розрахунки інших місяців проводиться аналогічно. Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Результати розрахунків

ВЕУ	травень (31 д)	червень (30 д)	липень (31 д)	серпень (31 д)	За сезон $Q_{веуΣ}$
АВЕУ6-4М	2278	1940	1234	1645	7097
WE8000	2614	2223	1429	1695	7961

Визначення кількості вітроустановок для задоволення потреб енергії.

Попередньо оцінимо забезпеченість потрібної енергії від однієї установки:

$$П = \frac{W_{ВЭУ} \cdot \eta_{эк}}{Q_п} \cdot 100\%$$

де - ККД електричного нагрівача (ТЕНи), що приймається рівним одиниці;

$Q_н$ = 1600 МДж – необхідна кількість енергії.

Наприклад, у липні вітроустановка АВЕУ6-4М може забезпечити 77,13 % необхідної енергії, П = 1234/1600 · 100 % = 77,13 %, а установка WE8000 – 89,31%.

Таблиця 4.3. Результати розрахунків

Показники		травень	червень	липень	серпень	За сезон
Необхідна енергія $Q_н$		1600	1600	1600	1600	6400
П,%	АВЕУ6-4М	100	100	77,13	100	94,28 (середнє)
	WE8000	100	100	89,31	100	97,33 (середнє)
Кількість	АВЕУ6-4М	1	1	2	1	2
	WE8000	1	1	2	1	1

Установка АВЕУ6-4М забезпечує потребу в енергії загалом на 94,28 % за однієї установки. Установка WE8000 у середньому забезпечує потребу в енергії на 97,33%.

Визначення енергетичних показників ВЕУ

Коефіцієнт використання енергії, що виробляється визначається для кожного місяця і розглянутого варіанту. Наприклад, у серпні при використанні двох установок АВЕУ6-4М ($n_{ВЕУ}$ = 2) кількість енергії $Q_{ВЕУ}$=1645·2=3290 МДж. При необхідній енергії $Q_н$ = 1600 МДж корисно енергія що використовується приймається рівною $Q_{пол}$ = $Q_н$, так як теплова енергія, що отримується від ВЕУ, більше необхідної.

Коефіцієнт використання енергії, що виробляється (приклад для 2 установок)

$$К_{исп}^{ВЭУ} = \frac{Q_{пол}}{W_{ВЭУ} \cdot \eta_{эл} \cdot} = 1600/(1695 \cdot 2) = 0{,}48.$$

При використанні WE8000 (приклад для 1 установки)

$$К_{исп}^{ВЭУ} = \frac{1600}{1695 \cdot 1} = 0{,}94 \cdot$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.4. Коеф. забезпечення енергією $К_{заб}$ = П/100.

Таблиця 4.4. Результати розрахунків

Кількість ВЕУ, шт.	травень		червень		липень		серпень		За сезон (середнє)	
	$К_{вик}$	$К_{заб}$	$К_{вик}$	$К_{заб}$	$К_{вик}$	$К_{заб}$	$К_{вик}$	$К_{заб}$	$К_{вик}$	$К_{заб}$
АВЕУ6-4М										
1	0,70	1	0,82	1	1	0,77	1	1	0,88	0,94
2	0,35	1	0,41	1	0,62	1	0,48	1	0,47	1
WE8000										
1	0,61	1	0,72	1	1	0,89	0,94	1	0,82	0,97
2	0,3	1	0,36	1	0,56	1	0,47	1	0,42	1

Отже для задоволення потреби у енергії необхідні дві вітроустановки АВЕУ6-4М чи типу WE8000. Коефіцієнт використання їх становить 0,47 та 0,42.

Відповідно до режиму повторюваності швидкості вітру робочий режим настає з відповідною ймовірністю. Забезпеченість робочої швидкості вітру p(v), $v>v_{min}$, та середня тривалість роботи ВЕУ (N днів) протягом місяця наведено у таблиці 4.5. (дані з табл. 4.1).

Таблиця 4.5. Результати розрахунків

ВЕУ	травень		червень		липень		серпень		За сезон	
	p(v)	N	p(v)	N	p(v)	N	p(v)	N	p(v) (середнє)	N (сума)
АВЕУ6-4М	0.52	16	0.49	15	0.38	12	0.42	13	0.45	56
WE8000	0.81	25	0.82	24	0.79	25	0.79	25	0.8	99

Вітроустановка АВЕУ6-4М протягом сезону може працювати в середньому 56 днів і виробляти енергію близько 7097 МДж, коли як установка WE8000 у якій v_{min} = 2 м/с, працює 99 днів, виробляючи 7961 МДж. Протягом місяця установка АВЕУ6-4М забезпечує споживача енергією загалом 56 дн./4 міс. = 14 днів, а WE8000 - 99 днів. / 4 міс. = 25 днів. В решту днів працює дублююче джерело.

Визначення економічної ефективності вітроустановки

Розраховуємо кількість корисної енергії за сезон і кількість зекономленого палива для підігріву води:

$$Q^{c}_{\text{пол}} = \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{п}_i} \cdot \text{К}_{\text{об}_i}$$

Наприклад, при використанні двох установок WE8000:

$$Q^{c}_{\text{пол}} = 1600(1+1+1+1)=6400 \text{ МДж.}$$

$$\Delta\beta = \frac{Q^{c}_{\text{пол}}}{Q^{н}_{р}\eta_{эк}} = \frac{6400}{34500} = 0{,}186 \text{ тис.м}^3\text{/сезон}$$

де 34500 кДж/м3 – теплота згоряння газу.

При використанні однієї установки WE8000:

$$Q^{c}_{\text{пол}} = 1600(1+1+0{,}89+1)=6224 \text{ МДж.}$$

$$\Delta\beta = \frac{Q^{c}_{\text{пол}}}{Q^{н}_{р}\eta_{эк}} = \frac{6224}{34500} = 0{,}181 \text{ тис.м}^3\text{/сезон}$$

Результати розрахунків занесено до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Результати розрахунків

Варіант енергозбереження		Корисна енергія, МДж	Економія палива, тис. $м^3$/сезон	Вартість зекономленого палива $Ц_т$, грн/сезон
АВЕУ6-4М	1	6032	0,175	0,175 х 16500 = 2877 грн.
	2	6400	0,186	0,186 х 16500 = 3069 грн.
WE8000	1	6224	0,181	0,181 х 16500 = 2986 грн.
	2	6400	0,186	0,186 х 16500 = 3069 грн.

Частина енергії, яка не використовується для нагрівання води, може бути продана за «зеленим тарифом». Для вітроустановок – 361,06 коп/кВт·год.

Визначається за формулою $Q_{ел} = (Q_{ВЕУΣ} \cdot n_{ВЕУ} - {}^{c}Q_{пов})/3,6$, де $Q_{ВЕУΣ}$ з табл. 2.

Вартість енергії за "зеленим тарифом" $Q_{ел} = 3,6106$, грн / сезон.

Результати розрахунків представлені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Результати розрахунків

Показники	АВЕУ6-4М		WE8000	
	1 шт.	2 шт.	1 шт.	2 шт.
Енергія на нагрів води, МДж	6032	6400	6224	6400
Надлишок енергії за «зеленим тарифом» $Q_{ел}$, кВт·ч	296	2165	483	2645
Вартість енергії за «зеленим тарифом» $Ц_{е}$, грн. /сезон	1069	7817	1744	9550
Сумарний ефект від викор. ВЕУ $Ц_{е} + Ц_{т}$, грн/сезон	3946	10886	4730	12619

Таким чином, найбільш ефективним є варіант з використанням двох установок типу WE8000.

ВИСНОВКИ

Під час написання дипломного проекту був проведений аналітичний огляд спеціалізованої літератури відповідно теми проекту. Були розглянуті майже всі існуючі вітроенергетичні установки, описані їх конструктивні особливості роботи, а також переваги і недоліки. Були наведені статистичні дані з відкритих джерел інформації щодо світової статистики використання вітрової енергії та її перспективи.

Дана робота була присвячена розрахунку і подальшому порівнянню двох вітроенергетичних установок, що використовуються у системі гарячого

водопостачання з необхідною кількістю енергії 1600 МДж – АВЕУ6-М та WE8000. Були проведені розрахунки щодо кількості установок необхідних для споживача, показників енергоефективності кожної з установок і найголовніше – визначена їх рентабельність.

Для задоволення потреби у енергії необхідні дві вітроустановки АВЕУ6-4М чи типу WE8000. Коефіцієнт використання їх становить 0,47 та 0,42.

Вітроустановка АВЕУ6-4М протягом сезону може працювати в середньому 56 днів і виробляти енергію близько 7097 МДж, коли як установка WE8000 у якій v_{min} = 2 м/с, працює 99 днів, виробляючи 7961 МДж. Протягом місяця установка АВЕУ6-4М забезпечує споживача енергією загалом 56 дн./4 міс. = 14 днів, а WE8000 - 99 днів. / 4 міс. = 25 днів. В решту днів працює дублююче джерело. Найбільш ефективним є варіант з використанням двох установок типу WE8000.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Плешка М.С., Вирлан П.М., Стратан Ф.І. та ін. Теплонасосні геліосистеми опалення та гарячого водопостачання будівель. - Кишинів: Штіінця, 1990. – 122с.
2. Р. Секретаріат, Renewable 2019 – Global Status Report (REN21, Париж, 2019)
3. Огляд світового ринку на 2019–2023 роки. Get-invest.eu. (2019).

4. К.Л. Арчер, М.З. Джейкобсон, Просторові та тимчасові розподіли вітрів США та вітрової енергії на висоті 80 м, отримані за результатами вимірювань
5. К.П.Рукікаере. Інвестиції у відновлювані джерела енергії.
6. Хайнріх Г. та ін. Теплонасосні установки для опалення та гарячого водопостачання / пров. з ним. Н.Л. Кораблева, Е.Ш. Фельдмана /за ред. Б.К. Явнеля. - М.: Будвидав, 1985. – 351 с.
7. Агєєв В.А. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. (курс лекцій).
8. Берковський Б.М., Кузьмін В.А. Відновлювані джерела енергії на службі людини. – М: Наука,1987
9. Твайделл Дж., Уейр А. Відновлювані джерела енергії / Пер. з англ. – М: Енергоатоміздат, 1990
10. Секторов В.Р. Бакалавська дослідницька вітроелектрична станція «Електроенергія», 1993р.- № 2. – С. 25-28.
11. В.В. Сідоров Вітроенергетичні установки і системи, Зовнторгвид. 1990, 167с.
12. https://www.green-mechanic.com
13. https://www.linquip.com