МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр»

на тему: «АВТОНОМНА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ»

Виконав : студент 4 курсу, групи НФ-41
Єлизавета ЛОБАНОВА
Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: прикладна фізика енергетичних систем
Керівник: доцент
Олександр КОШЕЛЬНІК

Рецензент:

Харків - 2021 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології____
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) __бакалавр
Напрям підготовки 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.І.Ткаченко
підпис

"____"_____2021_року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Лобановій Єлизаветі Сергіївні

1. Тема роботи "Автономна вітроенергетична установка для вироблення електричної енергії"

Керівник роботи: Кошельнік Олександр Вадимович, доцент

затверджені наказом по університету від "__" _____20__р. №_____

2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 р.

3.Перелік питань, які потрібно розробити:

Огляд історії розвитку та сучасного стану використання вітроенергетичних установок. Аналіз характеристик вітроенергетичного потенціалу місцевості. Розрахунок потужності та основних характеристик вітроенергетичної установки. Визначення економії органічного палива та екологічного ефекту. Вибір елементів автономної енергоустановки.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд розвитку конструкцій вітроустановок.
2	Проведення розрахунків енергетичного потенціалу вітра.
3	Розрахунки вітроенергетичної установки.
4	Визначення ефекту від застосування ВЕУ.
5	Вибір основних елементів установки.

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ Є.С.Лобанова

Керівник роботи _____ О. В. Кошельнік

Перелік скорочень та абревіатур

ВЕС — вітроелектростанція

ВЕУ — вітроенергетична установка

ДГ— дизельний генератор

HAWT — вітроустановки з горизонтальною віссю

VAWT — вітроустановки з вертикальною віссю

РЕФЕРАТ

Лобанова Єлизавета Сергіївна «Автономна вітроенергетична установка для вироблення електричної енергії» (випускна робота «бакалавра»). – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021. – 55с.

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків; містить 16 рисунків, 5 таблиць, перелік використаних джерел з 22 найменувань.

Встановлена оцінка вітрового потенціалу місцевості та визначено можливого вироблення електричної енергії та обрано вітроагрегат. Здійснено розрахунок основних параметрів вітроагрегату, розрахунок можливої економії органічного палива та екологічного ефекту від скорочення викидів вуглекислого газу. Обрано елементи автономної системи електропостачання. Проаналізовано способи отримання електричної енергії з використанням автономної вітроенергетичної установки.

Ключові слова: АВТОНОМНА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, ЕКОНОМІЯ ПАЛИВА, ВИБІР ОБЛАДНАННЯ.

РЕФЕРАТ

Лобанова Елизавета Сергеевна «Автономная ветроэнергетическая установка для выработки электрической энергии» (выпускная работа «бакалавра»). — Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2021. – 55с.

Работа состоит из вступления, трех разделов, выводов; содержит 16 рисунков, 5 таблиц, перечня использованных источников из 22 наименований. Установлена оценка ветрового потенциала местности и определено возможное производство электрической энергии и выбран ветроагрегат. Осуществлен расчет основных параметров ветроагрегата, расчет возможной экономии органического топлива и экологического эффекта от сокращения выбросов углекислого газа. Выбраны элементы автономной системы энергообеспечения. Проанализированы способы получения электрической энергии с использованием автономной ветроэнергетический установки.

Ключевые слова: АВТОНОМНАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ, ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА, ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ.

ABSTRACT

Lobanova Yelyzaveta Serhiivna "Autonomous wind power plant for electricity generation" (bachelor’s thesis). — Kharkiv: KhNU named after V.N. Karazin, 2021. — 55p.

The work consists of the introduction, three sections, conclusions; it contains 16 figures, 5 tables, the list of sources used with 22 items. The estimation of the wind potential of the area is established, the possible production of electric energy is determined and a wind turbine is chosen. The calculation of the main parameters of the wind turbine, the calculation of the possible savings in organic fuel and the environmental effect of reducing carbon dioxide emissions. The elements of the autonomous power supply system are selected. The ways of obtaining electric energy using autonomous wind power plant are analyzed.

Key words: AUTONOMOUS WIND POWER PLANT, ENERGY POTENTIAL, FUEL SAVING, EQUIPMENT SELECTION.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 1

РОЗДІЛ 1. Енергетичний потенціал вітру. 3

1.1. Вітер як явище природи. 3

1.2. Характеристики вітру. 6

1.3. Оцінка енергетичного потенціалу вітру. 9

РОЗДІЛ 2. Вітроенергетичні установки та основи їх розрахунку. 13

2.1. Історія розвитку та сучасний стан вітроенергетики. 13

2.2. Класифікація вітрових установок(вітрових турбін)..... 18

2.3. Вітрові установки з горизонтальною віссю. 20

2.4. Вітроустановки з вертикальною віссю..... 26

2.5 Основи ттеорії розрахунку вітроустановок. 31

РОЗДІЛ 3. Розрахунок роботи автономної вітроенергетичної установки... 34

3.1. Вихідні дані..... 34

3.2. Розрахунок параметрів вітру..... 35

3.4. Вибір елементів автономної системи електропостачання. 41

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво електроенергії за допомогою вітру – потенційна область для розвитку альтернативної енергетики в Україні. На сьогоднішній день виснаження запасів палива та викопних ресурсів є глобальною проблемою економічного та екологічного станів України. Вирішення даних труднощів є головною метою нетрадиційних джерел енергетики.

Виробництво електроенергії за допомогою вітру — потенційна область для розвитку альтернативної енергетики в Україні. За даними Асоціації вітроенергетики, потенціал вітроенергетики в Україні оцінюється в 30 000 ГВт·год Деякі дослідники вважають, що Україна входить до четвірки найбільш придатних європейських країн для вироблення електроенергії за допомогою вітру.

Станом на кінець 2011 року встановлена потужність складала 89 МВт, а кількість електроенергії, виробленої за рахунок вітру, становила 151 МВт. Для порівняння, потужність вітряних турбін в ЄС у 2011 році становила приблизно 94 ГВт.

Інтенсифікація сучасного процесу будівництва вітряних турбін в Україні почалася у 2011 році з будівництва вітроустановки в Новоазовську. Великі вітропарки розташовані у Миколаївській і Донецькій областях. У січні 2012 року введена в експлуатацію сучасна Новоазовська ВЕУ потужністю 107,5 МВт. У 2011 році в Херсонській області введені в експлуатацію вітроенергетичні установки «Вітропарк Очаків» потужністю 25 МВт.

У 2011 році сучасні вітряні турбіни потужністю 65,5 МВт були побудовані в Україні, а загальна потужність всіх вітряних турбін в Україні була збільшена до 150 МВт.

Близько 50% території України придатне для установки вітряних турбін і комерційного виробництва електроенергії за допомогою вітру. Зокрема, потенційними територіями є узбережжя Чорного моря, південні степові райони і Карпати.

Мета. Метою роботи є розробка автономної вітроенергетичної установки для покриття електричного навантаження заданої потужності.

Об’єкт дослідження. Автономна вітроенергетична установка.

Особистий внесок. Вибір оптимальної вітроустановки для умов незначних вітрових навантажень.

РОЗДІЛ 1. Енергетичний потенціал вітру.

1.1. Вітер як явище природи.

Вітер – це рух повітря, викликаний нерівномірним нагріванням Землі сонцем. Він не має особливої матерії — його не можна побачити або узяти в руки, але можна відчути його силу. Він може висушити одяг влітку і застудити до кісток взимку. Він досить сильний, щоб переміщувати вітрильні кораблі по поверхні океану і виривати з корінням із землі величезні дерева. Це головний вирівнювач атмосфери, що переносить тепло, вологу, забруднюючі речовини та пил на величезні відстані по усій земній кулі. Форми рельєфу і процеси їх утворення, які виникають під дією вітру називаються еоловими.

Розрідження в атмосферному тиску породжують вітри. На екваторі сонце нагріває воду і сушу сильніше, ніж на будь-якій іншій частині земної кулі. Тепле екваторіальне повітря підіймається вище в атмосферу і мігрує до полюсів. Це система низького тиску. Водночас більш холодне і щільне повітря рухається над поверхнею Землі до екватора, щоб замінити нагріте повітря. Це система високого тиску. Вітри зазвичай переміщуються із зон високого тиску в зони низького тиску. Межа між цими двома областями називається фронтом. Складні взаємовідносини між фронтами викликають різні типи вітрів і погодних умов.

Переважаючі вітри — це вітри, що дмуть з одного напряму над певною ділянкою Землі. Області, де переважаючі вітри зустрічаються, називаються зонами конвергенції. Як правило, переважаючі вітри дмуть зі сходу на захід, а не з півночі на південь. Це відбувається тому, що обертання Землі створює так званий ефект Коріоліса. Ефект Коріоліса примушує вітрові системи закручуватися проти годинникової стрілки в Північній півкулі і за годинниковою стрілкою в Південній півкулі.

Ефект Коріоліса примушує деякі вітри переміщуватися уздовж країв систем високого і низького тиску. Такі вітри називаються геострофічними. У 1857 році нідерландський метеоролог Христофер Бейс-Баллот сформулював

закон про геострофічні вітри: Коли ви стоїте спиною до вітру в Північній півкулі, низький тиск завжди знаходиться ліворуч від вас. (У Південній півкулі системи низького тиску будуть праворуч від вас).

На Землі існує п'ять основних вітрових зон: полярні східні вітри, західні вітри, вітри в кінських широтах, пасати і штиль.

Полярні східні вітри — це сухі, холодні переважаючі вітри, що дмуть зі сходу. Вони виходять від полярних максимумів — зон високого тиску навколо Північного і Південного полюсів. Полярні східні вітри дмуть на області низького тиску в субполярних регіонах.

Західні вітри — це переважаючі вітри, що дмуть із заходу в середніх широтах. Вони формуються під впливом полярних східних вітрів і вітрів з кінських широт високого тиску, які омивають їх з обох боків. Західні вітри найбільш сильні взимку, коли тиск над полюсом низький, і найбільш слабкі влітку, коли полярний максимум створює сильніші полярні східні вітри.

Кінські широти — це вузька зона теплого, сухого клімату між західними і пасатними вітрами. Кінські широти знаходяться приблизно на 30 і 35 градусах північної і південної широти. Багато пустель, від безводної Атаками в Південній Америці до посушливої Калахарі в Африці, є частиною кінських широт. Переважаючі вітри в кінських широтах різні, але зазвичай слабкі. А якщо з’являються сильні вітри, то вони часто бувають нетривалими.

Пасати — це потужні переважаючі вітри, які дмуть зі сходу через тропіки. Пасати, як правило, дуже передбачувані. Вони зіграли важливу роль в історії досліджень, комунікації і торгівлі. Кораблі покладалися на пасати для встановлення швидких і надійних маршрутів через Атлантичний і, пізніше, Тихий океани. Навіть сьогодні судноплавство залежить від пасатів і океанських течій, які вони викликають. Пасати, що формуються над сушею (так звані континентальні пасати), тепліше і сухіше, ніж пасати, що формуються над океаном (морські пасати). Взаємозв'язок між континентальними і морськими пасатами може бути досить інтенсивним.

Місце, де зустрічаються пасати двох півкуль, називається зоною між тропічної конвергенції. Область навкруги цієї зони носить назву "штиль". Переважаючі вітри в штиль дуже слабкі, а погода надзвичайно спокійна. По суті, штиль низького тиску формується, коли сонце прогріває екваторіальну область і примушує повітряні маси підніматися і переміщатися на північ і південь. (Цей теплий екваторіальний вітер низького тиску знову опускається в районі кінських широт).

Вітер використовується як джерело енергії вже більше тисячі років — він штовхав кораблі по всьому світу і використовувався у вітряних млинах для перекачування води; він же приводив в рух величезні камені, щоб молоти зерно, виготовляти папір, пиляти колоди і дробити руду. Сьогодні енергія вітру в основному використовується для вироблення електроенергії для будинків, підприємств, лікарень, шкіл та промисловості.

Вітер — це відновлюваний ресурс, який не призводить до прямого забруднення довкілля. Енергія вітру використовується за допомогою потужних турбін. Вітряні турбіни є високими трубчастими вежами з двома або трьома лопатями, схожими на пропелери, що обертаються у верхній частині. Коли вітер обертає лопаті, лопаті обертають генератор і створюють електрику.

Часто вітряні турбіни розміщені у вітряних районах у вигляді масивів, що називаються вітряними електростанціями. Багато ВЕС було зведено на горах, в долинах і на шельфі, оскільки повітря з океану взаємодіє з повітрям суші.

Деякі люди вважають вітряні турбіни потворними і скаржаться на створений ними шум. Лопаті, що повільно обертаються, також можуть вбивати птахів і кажанів, але не так часто, як автомобілі, лінії електропередачі і висотні будівлі.

Проте, в період з 2000 по 2006 рік використання енергії вітру збільшилося більш ніж в чотири рази. Найбільше вітроенергетичних систем встановлено в Німеччині, за нею йдуть Іспанія, США, Індія і Данія. Розвиток також швидко росте у Франції і Китаї. Згідно з прогнозами галузевих експертів, якщо темпи

зростання збережуться, то до 2050 року третина світових потреб в електроенергії задовольнятиметься за рахунок вітру.

1.2. Характеристики вітру.

Основні метеорологічні дані. Кожна країна світу має свої метеорологічні служби, робота яких узгоджується зі Всесвітньою метеорологічною організацією, розташованою в Женеві. Метеослужби займаються тим, що реєструють метеорологічні зведення, до яких в свою чергу належать дані про силу і напрям вітру. Необхідно підкреслити той факт, що метеорологічні станції безперервного спостереження, навіть ті, які добре обладнані, реєструють тільки загальні атмосферні параметри. Цих даних недостатньо для, наприклад, обґрунтованого вибору оптимальної конструкції вітроустановки і загалом для прийняття інших технічних рішень, оскільки необхідні нам параметри вітру реєструються поблизу населених пунктів або аеропортів на висоті 10 м, тобто найбільш захищених від вітру місцях. Саме тому такі дані можна використати з метою приблизно оцінити вітроенергетичні ресурси певної місцевості. Для нашої мети необхідні детальні спостереження в кожному місяці року, в більшій кількості точок місцевості та на різних висотах.

Метеослужби класифікують швидкість вітру згідно зі шкалою Бофорта, яка основана на візуальних спостереженнях. Швидкість вітру визначається за допомогою усереднення показань анемометру за 10-хвилинний проміжок часу на висоті 10 м. Для розрахунку характеристик вітроустановок необхідно відстежувати флуктуації напряму і швидкості вітру, що неможливо у зв’язку з нечастим вимірюванням швидкості вітру (кожен час і рідше). Існують спеціальні анемометри для безперервного вимірювання швидкості вітру, проте вони доволі інерційні.

При розташуванні вітроустановок в місцевості, де можливе затінення від деяких напрямків вітру, надзвичайно важливо знати інформацію про напрямок

вітру. Напрямок вітру визначають за допомогою тієї сторони світу, звідки дме вітер.

Роза вітрів, що зображена на рисунку 1.1., показує середню швидкість вітру в різних напрямках або розподіл вітру по швидкостях для кожного напрямку.

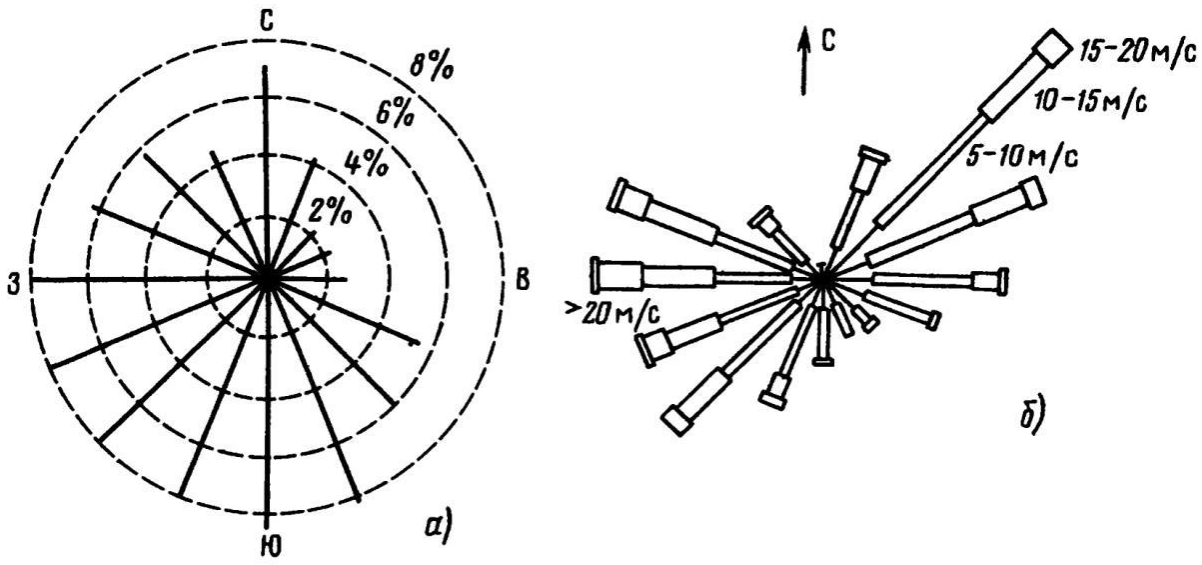


Рис.1.1.Роза вітрів: а) – дані про напрямок вітру; б) – дані про напрям та силу вітру. Частина пори року, впродовж якої вітер має швидкість у певному діапазоні, позначена відповідною довжиною прямокутника.

Залежність параметрів вітру від висоти. На розташовані на різних висотах вітроколеса по-різному діє вітер, тому що на різних висотах відрізняються швидкості вітру. На поверхні землі швидкість вітру дорівнює нулю (z = 0). Швидкість вітру збільшується до висоти розташування будівель чи дерев доволі складним чином, що показано на рисунку 1.2. Вище області місцевих перешкод залежність швидкості вітру від висоти має вигляд:

$$u_z = Vln(\frac{z-d}{z_0})$$

де d — значення декілька меншої висоти, ніж висота місцевих перешкод;

z0 — висота перешкод відносно d;

V — характерна швидкість.

Звідси можна зробити основний висновок: щоб набігаючий на вітроколесо потік вітру мав мінімальні флуктуації напряму і швидкості та був сильним та однорідним, вітроколесо необхідно встановлювати високо над місцевими перешкодами. В ідеалі це місце має бути куполоподібною височиною, оточеною водною поверхнею або полями.

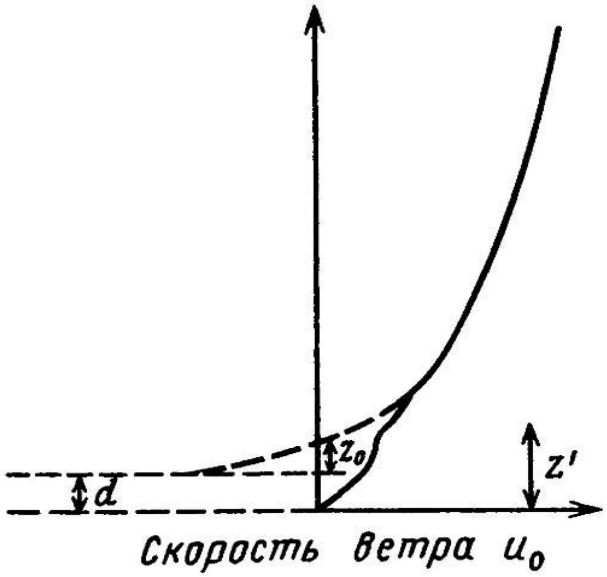


Рис.1.2.Залежність швидкості від висоти над поверхнею землі.

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

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

де u_s— стандартна швидкість вітру на висоті 10 м;

b'=0,14. Навантаження на лопаті будуть тим менші, чим менше параметр b'.

Зміна параметрів вітру від часу. Потребується дуже ретельно обирати параметри вітроустановки для місцевих метеорологічних умов. Важливіше знати потужність вітроустановки, яку вона може постійно забезпечувати, ніж кількість енергії яку вона може виробити впродовж року. Вітроустановки

виробляють достатню і навіть надмірну кількість електричної енергії, яку можна запасати, при сильному вітрі, коли його швидкість сягає 12 м/с. Для вітроенергетики райони зі швидкістю вітру менше 5 м/с вважаються малопридатними для розміщення вітроустановки, а зі швидкість більше 8 м/с — доволі сприятливими. Небезпечні навантаження на елементи конструкції вітроустановки викликають флуктуації з частотою близько 1/10 с -1, для них є характерною інтенсивність турбулентних пульсацій. Характер турбулентних пульсацій мають короткочасні пориви вітру.

1.3. Оцінка енергетичного потенціалу вітру.

Кінетична енергія вітру залежить від густини повітря і швидкості вітру. Густина повітря належить до числа стандартних умов, необхідних для визначення кривої потужності будь-якої вітроустановки. Густина повітря залежить від тиску та температури і вимірюється в кілограмах на кубічний метр. При визначенні енергії, виробленої вітроустановкою, необхідно взяти до уваги можливу відмінність середньої густини повітря в певному районі від густини повітря при стандартних умовах. Наступним способом можна визначити відношення середньої густини повітря в певній місцевості до стандартної густини повітря:

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

де ρ — густина повітря в певній місцевості;

ρ_0 — густина сухого повітря при стандартному тиску 760 мм ртутного стовпа і температурі 288 °К.

Миттєва швидкість вітру. Через вплив перешкод або рельєфу місцевості змінюється швидкість вітру в окремих місцях. Миттєва швидкість вітру V визначається як сума середньої швидкості вітру Vm та змінної складової ν:

$$V = V_m + v$$

Вертикальний градієнт швидкості вітру. Відомо, що швидкість вітру зростає з висотою відносно поверхні землі. Найчастіше для визначення швидкості вітру на певній висоті користуються степеневим розподілом зміни швидкості вітру залежно від висоти:

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

де $V1$ відповідає висоті $h1$;

$V2$ — висоті $h2$;

α змінюється від 0,1 до 0,24 і залежить від шорсткості поверхні землі.

Критерій Бетца — це критерій, справедливий для вітроустановки будь-якого типу, він визначає максимальну енергію вітрового потоку, який може використати вітродвигун. Вперше Бетцом було розраховано максимальне значення коефіцієнта потужності і воно дорівнює 0,592. В кращих промислових вітрогенераторах коефіцієнт потужності сягає близько 0,4.

Мінімальна робоча швидкість вітру — швидкість вітру, при якій вітроагрегат обертається з нульовою продуктивністю (холостий хід).

Максимальна робоча швидкість вітру — швидкість вітру, при якій розрахункова міцність вітроагрегату дозволяє виробляти енергію, уникаючи пошкоджень.

Циклонна швидкість вітру — максимальна швидкість вітру, Яка не пошкодить і не зруйнує зупинений вітроагрегат.

Розрахункова швидкість вітру — мінімальна швидкість вітру, при якій вітроагрегат досягає номінальної потужності.

Номінальна потужність вітроагрегату— максимальне значення вихідної потужності, на яку розрахований вітроагрегат.

Функція розподілу Вейбулла. Існує двопараметрична аналітична залежність, яка дуже часто використовується у вітроенергетиці, завдяки якій можна виразити вірогідну тривалість дії швидкостей вітру різних значень, параметри якої коливаються залежно від характеру місцевості.

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

Відповідає експериментальним даним при значеннях параметру c, близьких до значень середньої швидкості вітру і при значеннях параметру k від 1,8 до 2,3. Наведений вище вираз зводиться до одно параметричного розподілу Релея при k = 2:

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

Параметр масштабу c розподілу Вейбулла можна визначити за формулою:

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

Параметр форми k визначається за допомогою графіку інтегрального повторювання швидкості вітру. Значення k дає котангенс куту нахилу до осі абсцис.

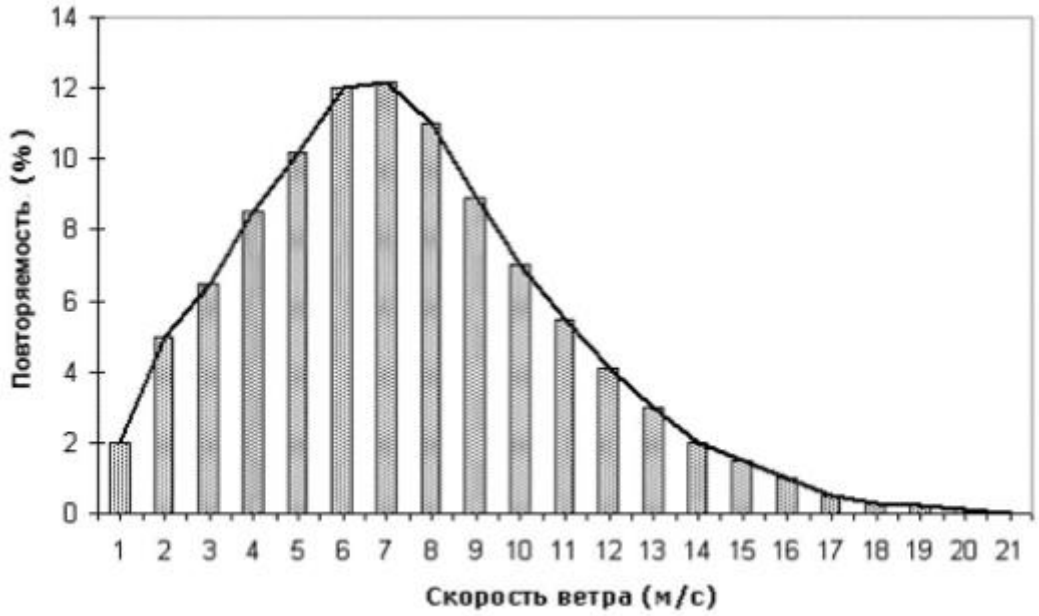


Рис.1.3. Графік та гістограма функцій Вейбулла повторення швидкості вітру.

Коефіцієнти обертового моменту, підіймальної сили та гальмування. Від характеристики аеродинамічної поверхні лопаті, куту атаки та відносної швидкості вітру залежать підіймальна сила та сила гальмування. Для забезпечення високої продуктивності турбіни необхідні великі значення коефіцієнту підіймальної сили і коефіцієнту гальмування. 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:

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

Коефіцієнт гальмування:

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

Потужність вітрового потоку. Потужність вітрового потоку — це кінетична енергія вітрового потоку, який проходить через площу, перпендикулярну до вітрового потоку протягом 1 с. Потужність, яку розвиває вітроколесо при швидкості вітру V_0:

$$P = C_p A \frac{\rho V_0^3}{2}$$

де C_p — коефіцієнт потужності, що характеризує ефективність використання енергії вітрового потоку вітроколесом.

РОЗДІЛ 2. Вітроенергетичні установки та основи їх розрахунку.

2.1. Історія розвитку та сучасний стан вітроенергетики.

Вітроенергетика має багатовікову історію, оскільки відомо, що людство використовувало енергію вітру ще з прадавніх часів: спочатку мореплавства і до створення першої парової машини, на яку замінили корабельні вітрила. Неподалік від міста Александрія, розташованого в Єгипті, були знайдені фрагменти кам'яних вітряних млинів, датовані II-I віком до н.е. Пізніше, у VIII-IX ст. більш досконалі конструкції вітряних млинів з'явилися на території Русі та Західної Європи. Вітродвигуни отримали більше поширення Англії, Росії та Голландії починаючи з XIII сторіччя та використовувались для розмелювання зерна, підйому води і навіть в якості приводу механізмів і верстатів. У середньовічній Європі задля забезпечення «вільного вітру» заборонялося висаджувати дерева поблизу вітряних млинів. У XIV сторіччі голландці вдосконалили конструкції та впровадили їх для висушення озер і боліт.

Перша олійниця, що використовувала енергію вітру була побудована в 1582 р. у Голландії, а через 4 роки — перша паперова фабрика. В період з 1608 по 1612 рік був висушений за допомогою 26 вітродвигунів польдер Бемстер. Наприкінці XVI ст. з'явились перші лісопильні заводи, на яких використовували вітроустановки. Тоді ж конструкції вітряних млинів та вітроколес зазнали суттєвих змін: вітрила були замінені тонким листовим металом, а виготовлені на фабриках вітряні млини могли розвивати потужність до 66 кВт. Вже у XIX ст. на території Голландії функціонували близько 9 тисяч вітродвигунів. Але після введення в експлуатацію парових двигунів використання вітрової енергії суттєво знизилось і на початку XX ст. працювало лише 2,5 тис. вітродвигунів.

Наприкінці XIX ст. загальна потужність 33 тис. вітродвигунів, встановлених і функціонуючих в Данії, становила близько 200 МВт. У 1890 р. правління королівства проводило програму розвитку потужних ВЕУ і вже у

1910 р. таких ВЕУ було зведено близько декількох сотен, їх вітроколеса мали чотири лопаті, діаметр 23 м і були з'єднані з електричними генераторами. Ці ВЕУ покривали невелику частину потреб королівства в електричній енергії. Після другої світової війни в Данії встановили і перевірили декілька експериментальних ВЕУ потужність від 12 до 200 кВт, проте у 1960 р. дізналися, що вартість енергії ВЕУ перебільшувала вдвічі вартість енергії теплового двигунів і проект зупинили.

У Німеччині модифікували та покращували легкі вітроколеса із системою регулювання нахилу лопатей і постійною частотою обертання. Для них використовували пластикові та склопластикові лопаті і вежі з порожніх труб, зміцнених дротовими стяжками. В період з 1957 до 1968 р. успішно функціонувала найбільша в Німеччині ВЕУ і при швидкості вітру 8 м/с розвивала потужність у 100 кВт.

У 1958-1966 р. поблизу Парижу були побудовані і функціонували три великі вітроустановки, що мали три лопатні вітроколеса крильчастого типу. Одна з них розвивала потужність 800 кВт при швидкості вітру 16,5 м/с, мала вітроколесо з діаметром 30 м, вежу з висотою також 30 м, у якій розмістили систему передач та генератор. Також у Франції конструювали та випробовували експериментальні установки з вертикальною віссю обертання.

В період з кінця 40-х років і протягом 50-х років минулого сторіччя у Великій Британії проводилася велика кількість робіт по створенню ВЕУ та вимірюванню характеристик вітру.

У 1950 р на Оркнейських островах розташували експериментальний вітродвигун установки з розрахованою потужність 100 кВт при швидкості вітру 15,6 м/с. Того ж року були розроблені і розміщені у Великій Британії та Алжирі нетипові ВЕУ з пневматичною передачею потужності. Пізніше було встановлено, що такі ВЕУ мають меншу потужність порівняно зі звичайними установками з горизонтальною віссю обертання.

В США малі вітродвигуни потужністю близько 0,75 кВт використовували з метою підйому води та вироблення електричної енергії. В середині XIX ст. було споруджено більше 6 мільйонів таких вітродвигунів.

Для підйому води здебільшого використовували вітродвигуни, які мали цільнометалічні вітроколеса діаметром 3,7 м, потужністю близько 120 Вт при швидкості вітру 6,7 м/с і які могли підняти на висоту 7 м 160 літрів води за хвилину. Для орієнтації за напрямом вітру вітроколеса були оснащені хвостовим оперенням. Вони оберталися на горизонтальних валах, котрі з'єднувався зі штангами, які приводили в дію насоси, за допомогою систем передач. Деякі вітронасосні установки і донині використовуються у віддалених місцевостях на заході США з метою водопостачання. Проте починаючи з 30-х років XX ст. на зміну ВЕУ прийшли енергосистеми, що забезпечували енергією більшість ферм. 930 р. Путмен досліджував вплив розмірів ВЕУ на її ефективність і дійшов висновку, що необхідні ВЕУ досить великих розмірів для того, щоб отримати мінімальну вартість електричної енергії. Для вироблення електроенергії задля живлення мережі Central Vermont Public Service Company.

Путмен з аеродинаміком Карманом розробили вітродвигун з високою потужність для найбільшої установки «Сміт-Путмен». Вітроколесо крильчастого типу мало дві лопаті, масу 16 т, діаметр 53 м і при розрахованій частоті обертань 28 об/хв розвивало потужність 1,25 МВт.

З приходом Великої Жовтневої революції парові машини, електродвигуни та двигуни внутрішнього згоряння витіснили вітряні млини примітивні вітрогенератори з багатьох галузей і вони залишилися здебільшого лише у сільському господарстві. Радянський вчений М.Є. Жуковський поклав початок для виробництва високопродуктивних вітрогенераторів завдяки своїй теорії швидкохідного вітродвигуна. Для електрифікації та механізації процесів сільського господарства радянські інженери та вчені розробили актуальні новітні схеми, а також досконалі конструкції різних типів для вітроенергетичних

установок і вітроелектростанцій. На початку XX ст налагодили промислове виготовлення електричних вітроагрегатів з не дуже потужними генераторами.

В 30-х роках одночасно розглядалися два проекти. Один з них — вітроелектрична система, потужність якої мала становити 5 МВт — так і не був реалізований. А Другий — вдосконалена вітроелектростанція з потужністю 100 кВт — була зведена на відстані 32 км від Ялти. Її вежа мала висоту 30 м, містила в собі регулюючі прилади з генератором і для орієнтації вітроколеса за вітром була оснащена похилою опорою, встановленою на візку. Над проектом ВЕС працювали численні видатні вчені та інженери радянської промислової вітроенергетики — Р.В. Секторов, Г.Х. Сабінін, В.В. Уткін-Єгоров, М.В. Красовський та В.Г. Щухов. Нажаль, під час другої світової війни ВЕС була зруйнована, вона встигла пропрацювати лише три роки.

Протягом 40 - 50-х років XX ст. інтенсивно розвивалося будівництво ВЕС та серійне виготовлення універсальних, а також спеціалізованих вітродвигунів. Виготовляли зазвичай вітродвигуни з електричними та механічними трансмісіями потужністю 0,7 - 11 кВт. Вони набули широкого використання у сільському господарстві і вважалися досить ефективними.

Створювалися новітні вдосконалені типи швидкохідних вітроагрегатів з використання пневматичних приводів, нових систем регулювання, насосів та генераторів. На території РСРР налічувалося прядка 8 - 9 тисяч вітродвигунів. Після нафтової кризи 1972 року задля позбуття залежності від постачання нафти з-за кордону відродилась вітроенергетика.

Перспективи розвитку. Є три основні етапи розвитку даного проміжку часу: до I етапу відносяться 1981 - 1990 роки, до II — 1991 - 2000 роки, а для III — 2001 - 2010 роки.

Перший етап характеризується розвитком вітроенергетики в 14 країнах світу: Бельгії, Данії, Німеччині, Греції, Італії, Нідерландах, Іспанії, Швеції, Великій Британії, Канаді, США, Індії, Японії та Португалії. Серед них третє місце по виробленій потужності займала Німеччина, чия потужність становила

60 МВт; друге місце — Данія з потужністю 310 МВт; перше місце займали США з потужністю 1525 МВт.

Протягом другого етапу кількість країн, на території яких встановлені ВЕС зросла до кількості 35. Також на першій позиції опинилася Німеччина і залишалася там до 2008 року. З 2000 р. топ 10 країн за кількістю виробленої електроенергії виглядав так: Швеція (231 МВт), Китай (316 МВт), Велика Британія (406 МВт), Італія (427 МВт), Нідерланди (445 МВт), Індія (1214 МВт), Іспанія (2235 МВт), Данія (2301 МВт), США (2578 МВт), Німеччина (6113 МВт).

Під час третього етапу кількість країн, що мають ВЕУ зросло до 76, 12 з яких виробили загальну встановлену потужність у розмірі більше 1500 МВт. США знову зайняли першу позицію по кількості виробленої потужності —25170 МВт.

Станом на 2007 р. доля виробленої на ВЕС енергії в світі перевищувала 1%, для Німеччини становила 7 %, для Португалії — 9,26 %6 для Іспанії —11,76 %, а для Данії — 21,22 %. З 1985 по 2008 р світова встановлена потужність зросла з 1,1 ГВт до 121,2 ГВт. В період з 2001 по 2008 рік середньорічні темпи росту складають 26,2 %, їх можна порівняти тільки з темпами росту фотоелектричних установок, а це, станом на 2008 рік топ десять країн світу за встановленням загальної потужності виглядає таким чином: Португалія (2862 МВт), Данія (3160 МВт), Велика Британія (3287 МВт), Франція (3404 МВт), Італія (3736 МВт), Індія (9587 МВт), Китай (12210 МВт), Іспанія (16740 МВт), Німеччина (23903 МВт), США (25170 МВт).

Враховуючи успіх по виробленню електричної енергії за допомогою ВЕУ в окремих країнах світу, можна дійти висновку, що к початку XXI ст вітроенергетика набула повноправності як окремий розділ електроенергетики. Для досягнення 12 % частки вітроенергетики у світовому виробленні електричної енергії до 2020 р була висунута програма «Wind Force 12». Згідно з прогнозом Європейської Вітроенергетичної асоціації к 2030 р в Європі

вироблена потужність ВЕС досягне 300 ГВт. Різні країни планують в наступні 5 років у 5-15 разів підвищити встановлену потужність ВЕС. Вірогідність здійснення цих планів досить висока, оскільки виходять із кількості укладених контрактів.

У зв'язку з недостатньою кількістю земельних ділянок у Європі, останні десять років досить швидко розвивалася галузь морських ВЕС. Можна вважати, що МВЕС отримають суттєвий розвиток і поширення у Великій Британії та Німеччині. Також цілком вочевидь, що в морі значно кращі вітрові умови; це ще один фактор для розвитку вітроенергетики в морі. Це може привезти до подорожчання питомої вартості виробленої потужності, проте значне збільшення вироблення електричної енергії приведе до компенсації витрат.

2.2. Класифікація вітрових установок(вітрових турбін).

ВТ перетворюють кінетичну енергію вітру в механічну або електричну енергію, зручну для практичного використання.

Механічна енергія, головним чином, використовується для підйому води в сільських або віддалених місцевостях. ВТ виробляють електричну енергію для побутових або промислових потреб, працюють в загальній електричній мережі або автономно, або спільно з будь-якими іншими автономними електростанціями.

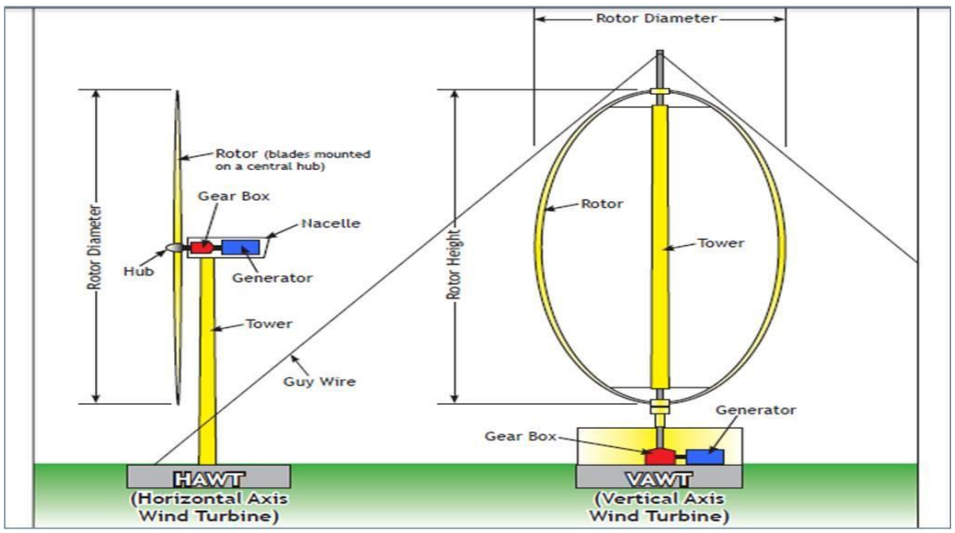


Рис.2.1. Два основні типи ВЕУ.

Існують два основні види вітрових турбін: вітряні турбіни з горизонтальною віссю обертання та вітряні турбіни з вертикальною віссю обертання, вони представлені на рисунку 2.1.

Вітрові турбіни з горизонтальною віссю обертання складають близько 98% усіх вітрових установок, підключених до мереж енергопостачання.

ВЕУ включає наступні основні елементи і вузли:

• Вітроколесо (ротор), за допомогою якого кінетична енергія вітру перетворюється на енергію обертання валу;

• гондолу, в якій зазвичай розташовують редуктор (деякі ВТ працюють без редуктора);

• генератор та інше механічне й електричне обладнання;

• вежу, яка підтримує вітроколесо і гондолу;

• електричне і електронне оснащення: панелі управління, електричні дроти, систему заземлення, устаткування для підключення до мережі, систему захисту ВЕУ від грози та ін.; фундамент забезпечує стійкість вітрової установки при дії на неї навантаження.

ВЕУ класифікуються за багатьма ознаками: конструкцією вітроколеса, принципу дії, швидкості обертання, положенню осі обертання відносно поверхні землі та іншим.

При взаємодії повітряного потоку з лопатями вітроколеса виникають відповідні сили. Так, результатом взаємодії якщо швидкості повітряного потоку зі швидкістю лопаті, буде швидкість потоку відносно лопаті. При цьому виді взаємодії виникають:

- сила опору F_c, паралельна вектору відносно швидкості набігаючого потоку;
- підіймальна сила F_n, спрямована перпендикулярно силі F_c. На відміну від літаків ця сила не підіймає вітрову установку, а примушує обертатися її вітроколесо;

- завихренність потоку повітря, що обдуває лопаті, в результаті якого виникає закручування повітряного потоку за вітроколесом, тобто його обертання відносно вектору швидкості набігаючого потоку;
- турбулентність потоку повітря, тобто хаотичний розподіл швидкості окремих його частин за величиною і напрямом. При цьому турбулентність виникає як перед лопаттю, так і зі зворотної сторони;
- перешкода для набігаючого потоку. Остання властивість характеризується параметром, що називається геометричним заповненням, яке дорівнює відношенню площі проекції лопатей на площину, перпендикулярну потоку (площина обертання лопатей) до площі обдування вітроколеса. Коефіцієнт геометричного заповнення прямо пропорційний кількості лопатей.

Як зазначено вище, по розташуванню осі обертання вітрового колеса вітрові турбіни поділяються на горизонтально-осьові і вертикально-осьові.

2.3. Вітрові установки з горизонтальною віссю.

У горизонтально-осьових ВЕУ (HAWT) головний вал вітроколеса і електричний генератор знаходяться на вершині вежі, а вітроколесо орієнтоване перпендикулярно вектору руху повітряного потоку. Більшість з них оснащені редукторами, які перетворюють повільне обертання вітроколеса значно швидше, відповідно приводу електрогенератора. Як показано на рисунку 2.2, найбільш поширеними комерційними конфігураціями HAWT є двох- і трилопатні вітроколеса. Такі вітроколеса можуть працювати як в навітряному, так і в підвітряному напрямі. Конфігурація "проти вітру" є поширенішою, оскільки при такому способі роботи ВЕУ створюється менше шуму і знижується риск швидкого зносу елементів конструкції ВЕУ.

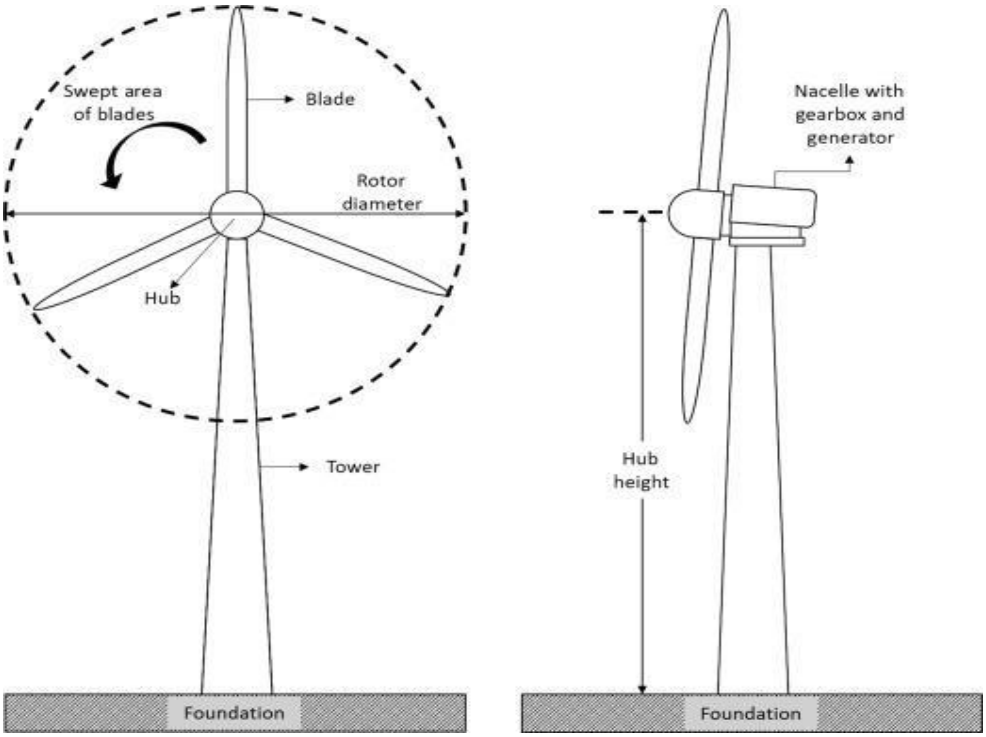


Рис.2.2. Схема (HAWT) — горизонтально-осьової ВЕУ.

HAWT є найбільш поширеними конструкціями вітроенергетичних установок, що використовуються в сьогоденні. Як правило HAWT оснащені аеродинамічними лопатями, встановленими на вітроколесі, яке може бути розташованим у напрямі як проти вітру, так і за вітром. HAWT, як правило, двох- або трилопатні і працюють з високою швидкістю обертання вітроколеса. Машини з підвітряним вітроколесом вимагають орієнтації за напрямом вітру, тоді як у навітряних лопаті конусоподібні, що дозволяє вітроколесу орієнтуватися самостійно. Проте один з недоліків навітряних роторів полягає тому, що вони, як відомо, "гуляють", коли намагаються вирівнятися за напрямом вітру в умовах низької швидкості, що погіршує вироблення енергії при низькій швидкості вітру.

Сучасні HAWT використовують аеродинамічну підйомну силу для обертання кожної лопаті вітроколеса, подібно до принципу дії літака. Підйомна сила зазвичай працює таким чином: під впливом дії вітру повітрям обдувається

як верхні, так і нижні частини лопатей. Проте в результаті кривизни лопаті повітря проходить над верхньою частиною лопаті швидше (через більшу довжину ребра), ніж над нижньою, створюючи область низького тиску на верхній стороні. Різниця тиску, що створюється між верхньої і нижньої сторонами лопаті, створює силу, діючу за напрямом верхньої частини лопаті.

Проте HAWT мають і деякі властиві їм недоліки, як показано на рисунку 2.3, підіймальна сила діє перпендикулярно "відносному вітру", що впливає на лопать вітрогенератора. Підіймальна сила фактично потужніша, ніж сила вітру, спрямована проти лопаті, або сила опору, яка діє паралельно повітряному потоку. Це дозволяє лопатям турбіни обертатися зі швидкістю, що перевищує ту, яку можна було б досягти, покладаючись тільки на силу опору. Хоча деякі ВЕУ також використовують силу опору для виробництва енергії, більшість HAWT спроектовані так, щоб мінімізувати силу опору при максимізації підіймальної сили.

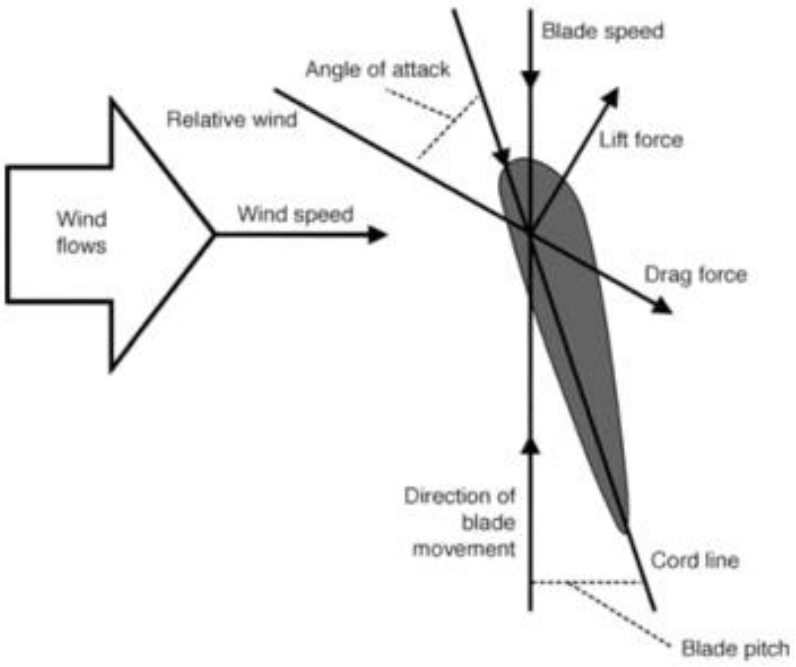


Рис.2.3. Ілюстрація підіймальної сили і сили опору, що діють на лопать аеродинамічного профілю.

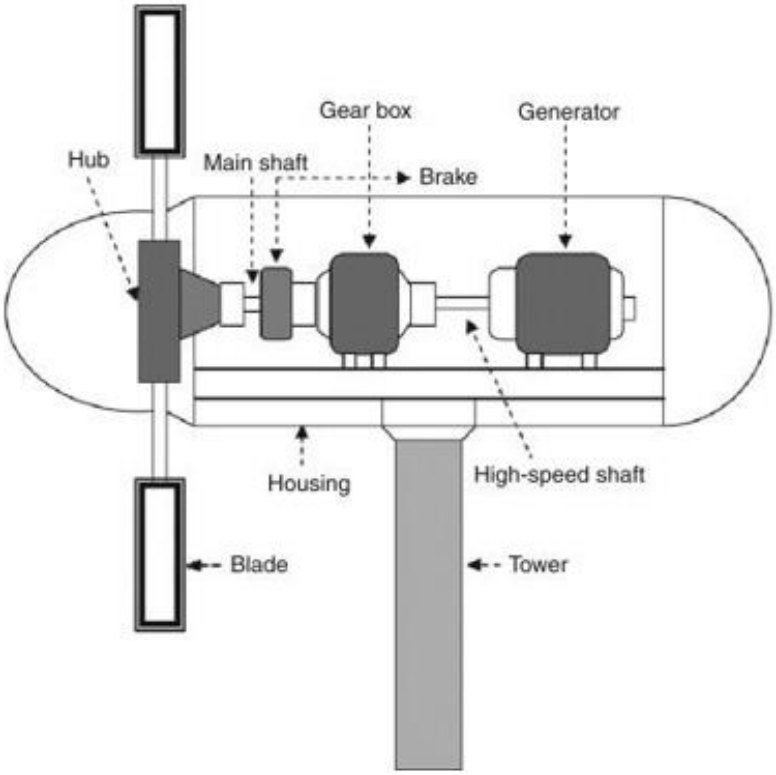


Рис.2.4. Конструктивні особливості типової HAWT.

HAWT працюють переважно за принципом підйомної сили. Коли потік вітру взаємодіє з лопатями вітроколеса, виникає підйомна сила, як пояснювалося вище, примушуючи ротор обертатися. Швидкість обертання залежить від конструктивних особливостей і розміру вітроколеса. Для типової турбіни потужністю МВт вона може складати всього 16 об/хв. Низько швидкісний головний вал передає це обертання на високошвидкісний вал через редуктор (існують також ВЕУ з прямим приводом, в яких немає редуктора в системі передач). Швидкість збільшується за допомогою зубчастих передач, відповідно до вищої швидкості, потрібної генераторам. Потім генератор перетворює механічну енергію в електричну. Між ними знаходиться ряд систем управління для кращої орієнтації за напрямом вітру, регулювання потужності і забезпечення безпеки.

Кількість лопатей вітроколеса в HAWT варіюється залежно від сфери застосування, для якої вони використовуються, і режимів вітру, в яких вони функціонують. Виходячи з кількості лопатей, ротори HAWT можна

класифікувати як одно лопатеві, дволопатеві, трилопатеві і багато лопатеві. Деякі з цих класифікацій зображені на рисунку 2.5.

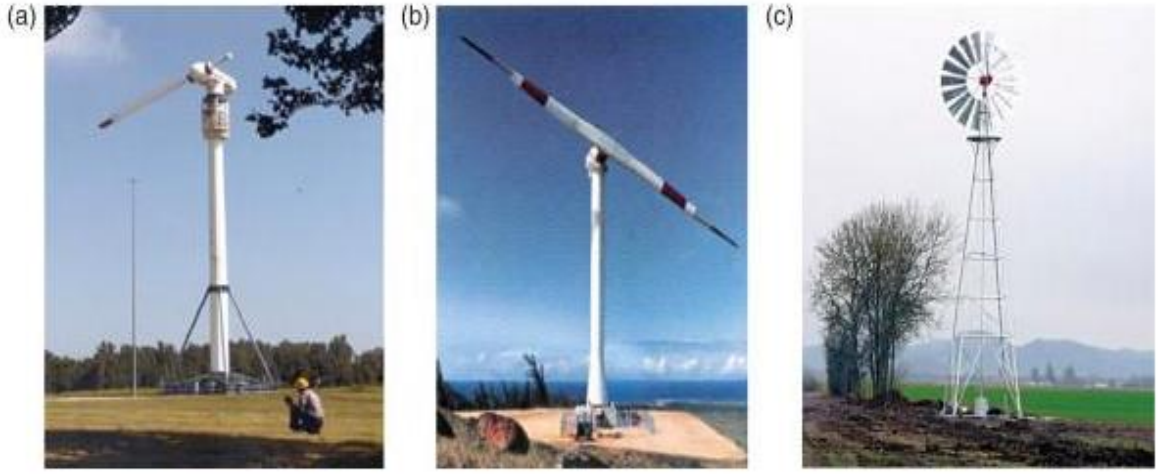


Рис.2.5. Однолопатеві (a), дволопатеві (b) і багато лопатеві (c) турбіни.

Основною перевагою одно лопатевого вітроколеса є економія матеріалів для виробництва лопатей, що робить їх дешевшими, порівняно з багато лопатевими вітроколесами. Слід зазначити, що вітроколесо складає 20-30 % від вартості сучасної вітроелектричної установки.

Окрім того, оскільки площа лопаті залежить від дії повітряного потоку, в одно лопатевих конструкціях мінімальна, втрати на опір поверхні лопаті також будуть нижчі. Однолопатеві конструкції не дуже популярні через проблеми з балансуванням візуальною естетичністю. Дволопатеві ротори також мають ці недоліки, але у меншій мірі. Більшість сучасних вітряних турбін, що використовуються для виробництва електроенергії, мають трилопатеві вітроколеса. Характер навантаження для них відносно рівномірний і вони візуально виглядають приємніше.

Існують також вітрові турбіни з великою кількістю лопатей ротора (наприклад, 6, 8, 12, 18 і навіть більше), які зазвичай використовуються для специфічних цілей, таких як підіймання і перекачування води. Наприклад, повітряна система перекачування води з поршневими насосами вимагає

високого пускового моменту для подолання початкового навантаження стовпа води на поршень.

Для таких систем потреба в пусковому моменті в 3-4 рази перевищує потребу в робочому моменті. Оскільки пусковий момент зростає зі збільшенням масивності (співвідношення між фактичною площею лопатей і площею обдування вітроколеса), для таких систем переважні вітроколеса з великою кількістю лопатей (висока масивність). Проте вони працюють при низьких значеннях швидкості обертання голівки і, отже, не рекомендуються для вітряних електрогенераторів. Аналогічно, їх ефективність також буде нижча, оскільки збільшуються аеродинамічні втрати.

Крім того, HAWT може мати вітроколеса висхідного або низхідного вітрового типу. У ВЕУ висхідного типу вітроколесо закріплене в передній частині агрегату, звернене безпосередньо до потоку вітру (рис.2.6), що обдуває вітроколесо. В протилежність цьому, у турбін низхідного типу ротор розташовується ззаду, залишаючи мотогондолу зверненою до вітру.

Основною перевагою навітряних роторів є те, що вони не страждають від впливу тіні від вежі. Проте вітроколеса на підвітряній стороні мають бути розміщені на деякій відстані від вежі, а для того, щоб вітроколесо завжди було звернене за напрямом вітру, потрібний механізм орієнтування. З іншого боку, навітряні машини гнучкіші і не вимагають наявності такого механізму у складі конструкції, це робить їх відносно дешевшими.

Якщо вітроколеса розташовані з підвітряного боку вежі (рис.2.6), може виникнути нерівномірне навантаження на лопаті, коли вони потраплять в зону дії тіні вежі.

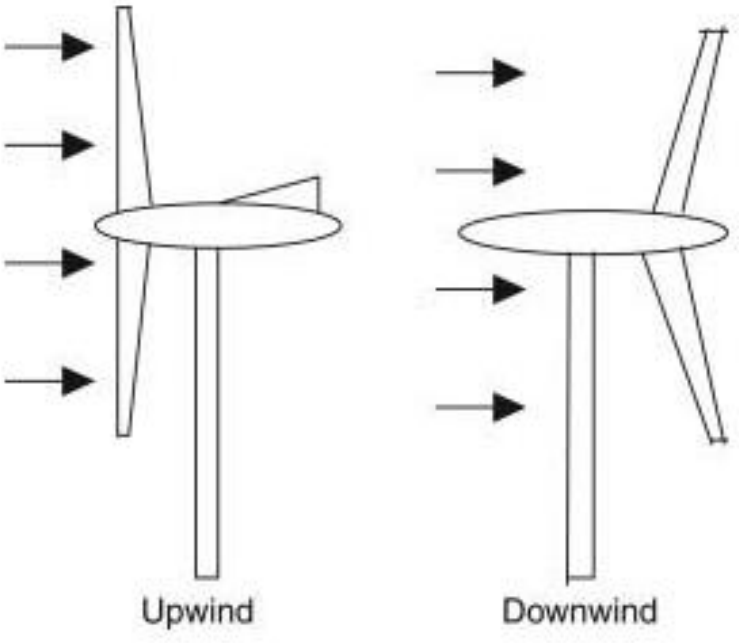


Рис.2.6. Навітряні і підвітряні турбіни.

2.4. Вітроустановки з вертикальною віссю.

VAWT розроблені для збільшення площі захоплення і підвищення потужності, а також для збереження естетики оригінальної конструкції. Вони спроектовані таким чином, що конструкція містить у собі головний вал двигуна, який встановлюється паралельно, залежно від швидкості вітру. Прогрес в конструкції VAWT дозволяє розмістити основні компоненти вітроколеса в її основі. При такому розташуванні дуже легко проводити технічне обслуговування турбіни, оскільки основні компоненти, такі як генератор і редуктор, розташовані дуже близько до землі. Це дозволяє суттєво знизити витрати на технічне обслуговування. Крім того, VAWT сконструйовані таким чином, що вони не вимагають спеціальних пристроїв задля орієнтування за напрямом вітру; в результаті цього вони не потребують механізмів визначення напряму вітру.

ВЕУ з вертикальною віссю починають ставати усе більш популярними як спосіб локальної генерації електроенергії, особливо для нових споруд. Їх переваги полягають у тому, що вони можуть бути розміщені набагато ближче до

землі і ідеально підходять для розміщення на даху. Дві основні конструкції VAWT ґрунтовані на роторах Дар'є (з приводом від підіймальної сили) або Савоніуса (з приводом від опору).

Конструкція Дар'є, заснована на підіймальній силі, виглядає як вінчик для збивання і має довгі лопаті аеродинамічної форми (тобто конічні, як крила літака) для вироблення електричної енергії, коли вітер дме на лопаті перпендикулярно. Існує декілька варіацій ротора Дар'є, включаючи деякі з прямими лопатями, які часто називають гіроскопічними млинами (наприклад, «Windspire», рис.2.7), і новітні конструкції, включаючи конструкції компаній «Quietrevolution» (рис. 11) і «Urban Green Energy». У ідеальному вітровому середовищі з низькою турбулентністю вітроколеса Дар'є, як правило, мають нижчий ККД, ніж HAWT. Але в умовах високої турбулентності, спрямованих коливань вітру в міському середовищі, пристрої Дар'є можуть працювати плавніше і виробляти більше енергії, ніж HAWT.



Рис.2.7. «Windspire».



Рис.2.8. «Quietrevolution».

Найбільш поширеними VAWT являються конструкції Дар'є. Перші конструкції, такі як виготовлені компанією «FloWind» і розташовані на

перевалах Альтамонт і Техачапи в Каліфорнії, були побудовані і експлуатувалися в 1980-х роках. Фактично, до середини 1980-х років компанія «FloWind» виробила потужність, що сягала 95 МВт завдяки цим VAWT, які в піковий період виробляли до 100 мільйонів кіловат-годин. Проте через руйнування обладнання і меншого, ніж очікувалося, вироблення енергії усі ці системи були зняті з виробництва до середини 1990-х років.

Якщо розглядати ВЕУ з ротором Савоніуса згори і донизу, вона виглядатиме як дві ложки, обернені в протилежні сторони і сполучені в центрі з віссю ротора (утворюючи в поперечному перерізі форму букви "S" рис.2.9). Через особливості їх будови опір увігнутої поверхні вищий, ніж опуклої, що примушує ротор обертатися, коли на чашки діє сила вітру. Кажучи інакше, при обертанні проти вітру, конструкція зазнає меншого опору, ніж при обертанні за напрямом вітру, що створює диференціал, який примушує турбіну обертатися.

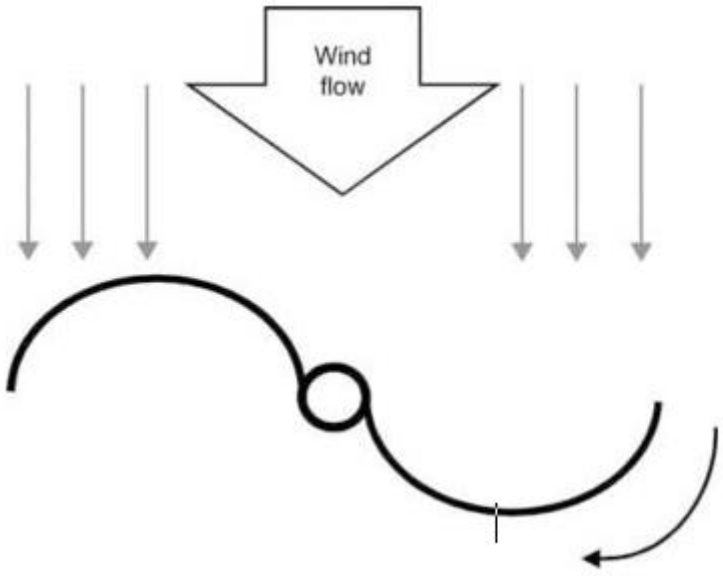


Рис.2.9. Ротор Savonius, вигляд зверху.

В порівнянні з HAWT і VAWT Дар’є, конструкції Савоніуса обертаються повільніше, але з високим обертовим моментом. Найбільш успішними VAWT на основі сили опору являються чашкові анемометри, які широко використовуються для спостерігання швидкості вітру. Оскільки вони використовують силу опору, VAWT з конструкцією Савоніуса мають нижчі швидкості обертання і коефіцієнти потужності, ніж ВЕУ, які використовують підіймальну силу.

Хоча вони мають низьку швидкість обертання, турбіни на основі сили опору, як правило, не вважаються подібними по кількості виробленої енергії. Крім того, турбіни Савоніуса вироблені з більшої кількості матеріалів, ніж механізми Дар’є, і досягають значно меншої аеродинамічної ефективності, ніж VAWT, працюючі на підіймальній силі.

Поступово збільшується кількість розташування турбін VAWT в містах. Наприклад, компанія «Quietrevolution» встановила багато турбін моделі «qr5» в містах Великобританії. Інша компанія — «Aerotecture», розробила VAWT з гібридним спіральним ротором Дар’є-Савоніуса, які розташували на декількох об'єктах в США.

«Aerotecture» виробляє у промислових масштабах дві моделі: 610 В і 712 В, з номінальною потужністю 1000 Вт і 2500 Вт відповідно при швидкості вітру 14,2 м/с. Ці ВЕУ були встановлені на декількох будівлях в районі Чикаго, а також в музеї Рендалла в Сан-Франциско зображених на рисунку 2.10.



Рис.2.10. Aerotecture VAWT в музеї Рендалла.

Место для уравнения.

У 2008 році, в особливо гучному прикладі, виробник PacWind інтегрував 16 своїх барабанних VAWT в рекламний щит на Таймс-сквер. Передбачалося, що цей проект дозволить заощадити від $12000 до $15 000 в місяць на електроенергії і запобігти викиду в атмосферу 16,3 метричних тонн вуглецю в рік. Проте з невідомих причин турбіни були демонтовані і замінені сонячними панелями.

Прибічники VAWT відмічають декілька переваг перед HAWT для міського застосування. По-перше, VAWT вважаються переважними для застосування на дахах, оскільки вони можуть працювати з вітром з усіх напрямів і краще працюють в умовах турбулентності, чим HAWT. По - друге, VAWT, як правило, працюють на нижчих швидкостях обертання і мають менше компонентів, що рухаються, таких як відсутність системи рискання для орієнтації турбіни за вітром, що теоретично може понизити витрати на технічне обслуговування. По-третє, знову ж таки із-за нижчої швидкості обертання VAWT можуть видавати менше шуму, що може бути проблемою для вітряних турбін поблизу житлових

будинків. Нарешті, VAWT вважаються естетичнішими і можуть бути інтегровані в довкілля як архітектурну прикрасу.

Проте, незважаючи на ці потенційні достоїнства, деякі аналітики вітрової промисловості застерігають від думки, що VAWT є панацеєю для вітроенергетики в містах. Більшість з них відмічають, що ці конструкції не нові - VAWT типу Савониуса і Даррье існують вже майже 80 років. Головна причина, по якій ці турбіни не так поширені, як HAWT, полягає в тому, що їх нижчий ККД і відносна вартість негативно позначаються на економіці проекту. Поки VAWT не стануть економніше ефективними, мало вірогідно, що вони займуть значне місце в якості розподіленої генерації в містах.

2.5 Основи ттеорії розрахунку вітроустановок.

Перетворення енергії вітру. Кінетична енергія об’єму повітря, що за одиницю часу проходить через площу обдування вітроколеса:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho A_1 u_0^3$$

де ρ — густина набігаючого повітряного потоку;

u_0 —його швидкість.

Будемо вважати, що ці параметри постійними в будь-якому поперечному перерізі повітряного потоку та часі.

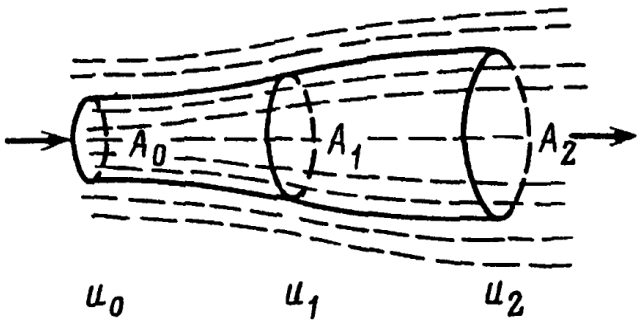


Рис.2.11. Модель взаємодії вітрового потоку з вітроколесом.

Існує корисна модель теорії вітроколеса, якою користуються незважаючи на те, що вона має велику кількість припущень. Згідно з цією моделлю вітроколесо розглядається у якості тонкого проникного диску, якому потік

повітря віддає частину своєї енергії, завдяки чому зменшуються тиск потоку і його імпульс. Варто відзначити, що ми зазвичай нехтуємо збуреннями, які вносяться в набігаючи ламінарний потік.

Силу, що діє на вітроколесо можна визначити як зміну кількості руху маси повітря, яке проходить крізь нього за одиницю часу. Потік повітря вважається однорідним.

$$F = \dot{m}u_0 - \dot{m}u_2$$

Потужність вітроколеса:

$$P = Fu_1 = \dot{m}(u_0 - u_2)u_1$$

Потужність P є енергією, яку втрачає вітровий потік при взаємодії з вітроколесом, і яка дорівнює:

$$P_W = \frac{1}{2}\dot{m}({u_0}^2 - {u_2}^2)$$

Якщо прирівняти два попередні вирази, можна отримати швидкість потоку повітря:

$$u_1 = \frac{u_0 + u_2}{2}$$

Звідси можна зробити висновок, що швидкість потоку повітря в площині вітроколеса не може бути меншою за половину швидкості набігаючого потоку. Коефіцієнт збурення або коефіцієнт індукції:

$$\alpha = \frac{u_0 - u_2}{2u_0}$$

Потужність вітроколеса можна визначити за допомогою потужності набігаючого вітрового потоку та частини цієї потужності, що передається вітроколесу.

$$P = C_p P_0$$

Максимальне значення $C_{p\,max}$= 0,59,тобто енергії набігаючого потоку у вітроустановці можна використати лише трохи більше половини.

Лобовий тиск на вітроколесо зображено на рисунку 2.12. Сила, діюча на вітроколесо:

$$F_A = \frac{C_F \rho A_1 u_0^2}{2}$$

Коефіцієнт лобового тиску, що залежить від параметрів вітроколеса:

$$C_F = 4\alpha(1-\alpha)$$

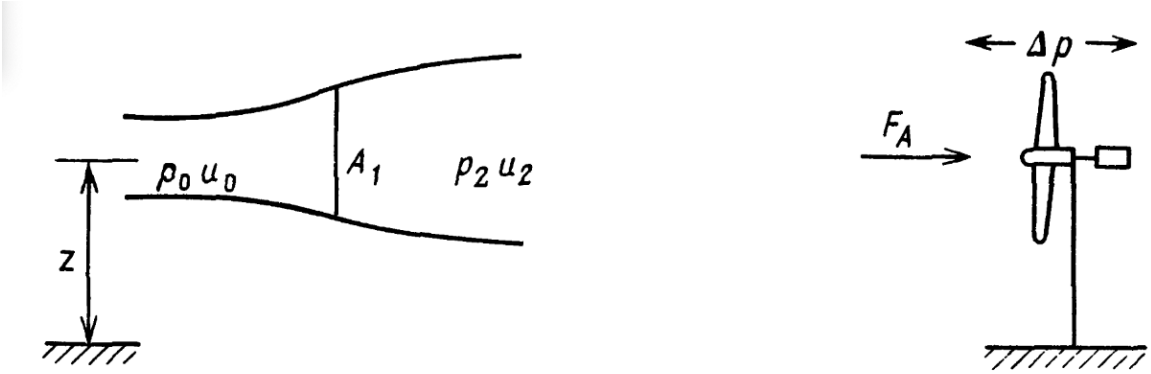


Рис.2.12.Лобовий тиск на вітроколесо.

Максимальний ККД вітроколеса, згідно з критерієм Бетца, досягається при α = 1/3, якому відповідає значення C_F = 8/9.

Крутний момент. Крутний момент вітроколеса можна представити у вигляді:

$$T = C_T T_{max}$$

де C_T- коефіцієнт крутного моменту.

Потужність, яку розвиває вітроколесо:

$$P = T\omega,$$

де T – крутний момент;

ω – кутова швидкість обертання вітроколеса.

РОЗДІЛ 3. Розрахунок роботи автономної вітроенергетичної установки.

3.1. Вихідні дані.

Дані про повторення швидкості вітру наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Місяць	Повторюваність швидкості вітру по градаціях у відносних одиницях v				
	< 2	2-3	3-5	5-7	8 та більше
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

Таблиця 3.1. Повторення швидкості вітру.

Розрахункова швидкість вітру для роботи установки: $w_{\text{роб}} = 8$ м/с.

Мінімальна швидкість вітру для роботи установки: $w_{min} = 2$ м/с.

Коефіцієнт потужності вітроколеса: C_p = 0,42.

Річна потреба у виробленні електричної енергії: $N_{\text{річ}}$ = 65200 кВт·ч/год.

3.2. Розрахунок параметрів вітру.

Середня швидкість вітру за місяць, м/с:

$$\overline{w_j} = 2{,}5\nu_{2-3j} + 4\nu_{3-5j} + 6\nu_{5-7j} + 8\nu_{8j} \text{ м/с.}$$

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

Лютий: $\overline{w_j} = 2{,}5 \cdot 0{,}2 + 4 \cdot 0{,}29 + 6 \cdot 0{,}25 + 8 \cdot 0{,}17 = 4{,}52$ м/с.

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

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

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

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

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

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

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

Жовтень: $\overline{w_j} = 2{,}5 \cdot 0{,}23 + 4 \cdot 0{,}32 + 6 \cdot 0{,}2 + 8 \cdot 0{,}15 = 4{,}26$ м/с.

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

Грудень: $\overline{w_j} = 2{,}5 \cdot 0{,}2 + 4 \cdot 0{,}34 + 6 \cdot 0{,}23 + 8 \cdot 0{,}16 = 4{,}52$ м/с.

де υ_{ij} – повторюваність швидкості вітру в кожному інтервалі за місяць.

Середня швидкість вітру за рік, м/с:

$$\overline{w_p} = \sum \frac{w_j}{12} =$$

$$\frac{4{,}59 + 4{,}52 + 4{,}165 + 3{,}92 + 3{,}94 + 3{,}86 + 3{,}87 + 3{,}9 + 4{,}08 + 4{,}255 + 4{,}405 + 4{,}52}{12} =$$

$$= 4{,}17 \text{ м/с.}$$

Час роботи установки за рік, діб / рік:

$$\tau_p = 365 - (31\nu_{2-I} + 28\nu_{2-II} + 31\upsilon_{3-III} + 30\nu_{2-IV} + 31\nu_{2-V} + 30\nu_{2-VI} + 31\nu_{2-VII} + 31\nu_{2-VIII} + 30\nu_{2-IX} + 31\nu_{2-X} + 30\nu_{2-XI} + 31\nu_{2-XII}).$$

$$\tau_p = 365 - (31 \cdot 0{,}09 + 28 \cdot 0{,}09 + 31 \cdot 0{,}11 + 30 \cdot 0{,}12 + 31 \cdot 0{,}11 + 30 \cdot 0{,}12 + 31 \cdot 0{,}09 +$$

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

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

Таблиця 3.2.

Показник	Величина по місяцях												За рік $\overline{w_j}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Середня швидкість вітру за місяць $\overline{w_j}$	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

Таблиця 3.2. Результати розрахунків швидкості вітру.

Для оцінки збільшення вітру від висоти (до 50м) скористаємося формулою:

$$\overline{w_j^{50}} = \overline{w_j} \cdot (\frac{H}{H_0})^{\alpha},$$

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

H= 50 м — запланована вистота розташування ВЕУ, м;

$\overline{w_j^{50}}$— визначена швидкість вітру на висоті H, м/с;

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

Тоді $(\frac{H}{H_0})^{\alpha} = (\frac{50}{10})^{0,14} = 1,25272516$, підставляємо у формулу оцінки збільшення вітру від висоти:

Січень: $\overline{w_j^{50}} = 4,59 \cdot 1,25272516 = 5,75$ м/с.

Лютий: $\overline{w_j^{50}} = 4,52 \cdot 1,25272516 = 5,66$ м/с.

Березень: $\overline{w_j^{50}} = 4,165 \cdot 1,25272516 = 5,22$ м/с.

Квітень: $\overline{w_j^{50}} = 3,92 \cdot 1,25272516 = 4,91$ м/с.

Травень: $\overline{w_j^{50}} = 3,94 \cdot 1,25272516 = 4,94$ м/с.

Червень: $\overline{w_j^{50}} = 3,86 \cdot 1,25272516 = 4,84$ м/с.

Липень: $\overline{w_j^{50}} = 3,87 \cdot 1,25272516 = 4,85$ м/с.

Серпень: $\overline{w_j^{50}} = 3,93 \cdot 1,25272516 = 4,89$ м/с.

Вересень: $\overline{w_j^{50}} = 4,08 \cdot 1,25272516 = 5,11$ м/с.

Жовтень: $\overline{w_j^{50}} = 4,255 \cdot 1,25272516 = 5,33$ м/с.

Листопад: $\overline{w_j^{50}} = 4,405 \cdot 1,25272516 = 5,52$ м/с.

Грудень: $\overline{w_j^{50}} = 4,52 \cdot 1,25272516 = 5,66$ м/с.

Середня швидкість вітру за рік на висоті Н, м/с: $\overline{w_p^{50}} = \sum \frac{\overline{w_p^{50}}}{12}$

Сума: $\overline{w_p^{50}}$=(5,75 + 5,66 + 5,22 + 4,91 + 4,94 + 4,84 + 4,85 + 4,89 + 5,11 + 5,33 + 5,52 + 5,66)/12 = 5,22 м/с.

Таблиця 3.3.

Показник	Величина по місяцях												За рік
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\overline{w_p}$
Середня швидкість вітру за місяць $\overline{w_j}$	5,75	5,66	5,22	4,91	4,94	4,84	4,85	4,89	5,11	5,33	5,52	5,66	5,22

Таблиця 3.3. Розрахунок виробництва електроенергії вітроустановкою.

Кількість електричної енергії, яка повинна надходити від ВЕУ, враховуючи час її роботи τ:

$$N_{\text{ВЕУ}} = \frac{N_p \cdot \tau}{365} = \frac{65200 \cdot 327}{365} = 58\,412 \text{кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Середня потужність, яку розвиває ВЕУ:

$$P_{cp} = \frac{N_{\text{ВЕУ}}}{24 \cdot \tau_p \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{р}}}$$

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

$\eta_{\text{р}} = 0{,}92$– ККД редуктора.

Підставляючи отримаємо: $P_{cp} = \frac{58\,412}{24 \cdot 327 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}92} = 8{,}52$ кВт.

Необхідна потужність повітряного потоку визначається:

$$P_0 = \frac{P_{cp}}{C_p} = \frac{8{,}52}{0{,}42} = 20{,}29 \text{ кВт}.$$

де $C_р = 0{,}42$— коефіцієнт потужності вітроколеса.

Необхідний діаметр вітроколеса визначається за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{8P_{ср}}{C_p \rho (w_p^{50})^3 \pi \eta_\tau \eta_p}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8{,}52 \cdot 10^3}{0{,}42 \cdot 1{,}23 \cdot 5{,}22^3 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}92}} = 18{,}38 \text{ м}.$$

Обираємо $D = 18{,}5$ м. Площа обування вітроколеса визначається за формулою:

$$A_{вк} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 18{,}5^2}{4} = 265 \text{ м}^2.$$

Встановлена потужність ВЕУ за заданою розрахованою швидкістю вітра $w_{роб}$ = 8 м/с:

$$P_д = 0{,}5 \cdot \rho \cdot A_{вк} \cdot w_p^3 \cdot C_p \cdot \eta_г \cdot \eta_р = 0{,}5 \cdot 1{,}23 \cdot 265 \cdot 8^3 \cdot 0{,}42 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}92 \cdot 10^3 = 30{,}63 \text{ кВт}.$$

Обираємо вітряну електростанцію Condor Air WES 380/50-30, характеристики якої представлені в таблиці 3.4, а також має автоматичний захист від штормового вітру та автоматичну орієнтацію за напрямом вітру.

Таблиця 3.4.

Характеристика	Значення	Одиниці вимірювання
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
Асинхронний тип генератору, min/max напруга з генератора	170-420	V
Частота струму	50	Гц
Вага гондоли	560	кг
Гранична швидкість вітру	35	м/с

Таблиця 3.4. Характеристики вітряної електростанції Condor Air WES 380/50-30.

Трифазний без щітковий генератор 380 В з частотою 50 Гц. В якості матеріалу для виготовлення лопатей використовується армований поліефір. Відносно невелика зона лопатей дозволяє витримати вітер високої швидкості. Станцію можна вважати не дуже гучною, оскільки вона оснащена ротором зі швидкістю 35-50 об/хв.

Станція облаштована системою ручного гальмування та автоматичним захистом від бурі.

Оскільки ефект положення вітрогенератора відповідає за дію динамічних напруг обертання, ця система доцільна для використання інстальованого вітрогенератора. Окрім цього гондола автоматично орієнтується за напрямом вітру.

Перерахування в теплову енергію енергії, виробленої ВЕУ:

(1кВт·ч = 3600 кДж)

$$Q_{\text{ВЕУ}} = N_{\text{ВЕУ}} \cdot 3600 = 58412 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 210\,283{,}2\,\frac{\text{МДж}}{\text{рік}}.$$

Річна економія умовного палива:

$$\text{В}_{\text{у.т.}} = \frac{Q_{\text{ВЕУ}}}{Q_{\text{у.п.}} \cdot \eta_{\text{ст}}} = \frac{210\,283{,}2}{29{,}33 \cdot 0{,}35} = 20484 \text{ кг. у. п.} = 20{,}48 \text{ т. у. п.}$$

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

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

Річна економія природного газу рахується за формулою:

$$\text{В}_{\text{пр.г.}} = \frac{\text{В}_{\text{у.т.}} \cdot Q_{\text{у.т.}}}{Q_{\text{пр.г.}}} = \frac{20{,}48 \cdot 29.33}{35{,}5} = 16{,}92 \text{ тис.}\frac{\text{м}^3}{\text{рік}},$$

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

Об’єм попередженої емісії вуглекислого газу:

$$\text{V}_{\text{уг}}^{\text{ВЕУ}} = 0{,}5 \cdot \text{N}_{\text{ВЕУ}} = 0{,}5 \cdot 58412 = 29206 \text{ кг} = 29{,}21 \text{ т.}$$

3.4. Вибір елементів автономної системи електропостачання.

Акумулятор — устаткування для накопичення електричної енергії, він дозволяє працювати приладам за умов нульового вироблення енергії ВЕУ.

Контролер заряду/розрядки — прилад, що дозволяє захищати від надлишку заряду та розрядки батарею акумулятора.

Інвертор — пристрій для перетворення постійного струму в змінний. Оскільки річна кількість виробленої ВЕУ енергії 58412 КВт.год/рік менша за

необхідну 65200 КВт.год/рік, ми вимушені використовувати дизельний генератор (ДГ) як резервне джерело живлення.

Загальна кількість годин роботи дизельного генератора:

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

Фактична кількість годин роботи ДГ:

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

де $\kappa_{\text{вик.дг.}} = 0{,}8$ — коефіцієнт використання встановленої потужності ДГ (відношення кількості фактично виробленої енергії до кількості енергії, яку б виробив ДГ, якщо працював би із установленим навантаженням).



Рис.3.1. Загальна схема під’єднання вітроустановки.

Кількість енергії, яка має надійти від ДГ:

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

Необхідна потужність ДГ:

$$\text{P}_{\text{дг}} = \frac{N_{\text{дг}}}{\tau_{\text{дг.факт.}} \cdot \eta_{\text{ак.}}} = \frac{6788}{729{,}6 \cdot 0{,}9} = 10{,}33 \text{ кВт},$$

де $\eta_{\text{ак.}} = 0{,}9$– ККД акумуляторної батареї, від якої споживач отримує енергію під час технічного обслуговування ДГ.

Обираємо ДГ KIPOR KDE16STA з номінальною потужністю 11,7 кВт, його характеристики наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

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

Таблиця 3.5. Характеристики вітряної електростанції ДГ KIPOR KDE16STA з номінальною потужністю 11,7 кВт.

Визначимо потужність інвертора:

$$P_{\text{інв.}} \geq 1{,}25 \cdot P_{\text{сум.}} = 8000 \cdot 1{,}25 = 10\,000\text{Вт}.$$

Інвертор сполучений з контролером заряду. Згідно зі значенням $P_{\text{інв.}} = 10\,000$Вт ,обираємо інвертор SMA Sunny Tripower 10000TL. Номінальна потужність навантаження: 10000 Вт. Вихідна напруга змінного струму – 230, 380 В. Діапазон вхідної постійної напруги – 370-800 В. Номінальна вихідна частота – 50 Гц.

Висновки.

В рамках кваліфікаційної роботи було виконано розрахунки параметрів вітру і розрахунки виробництва електроенергії вітроустановкою. В роботі наведено огляд класифікацій ВЕУ, проаналізовано типи вітроустановок, наведені їх характеристики і переваги.

Зокрема, наведені основні періоди в історії розвитку вітроенергетики у світі. З'ясовано економію органічного палива та об'єм попередженої емісії вуглекислого газу та розглянуті особливості вітру як явища природи, розглянуті основні характеристики вітру і зроблена оцінка його енергетичного потенціалу. Також представлені основні теорії розрахункувітроустановок та здійснено вибір елементів автономної системи енергопостачання.

Список використаних джерел:

1. Andrew Turgeon, Elizabeth Morse, Wind, Nov. 15, 2012.
2. Практичний посібник із впровадження компоненту з енергоефективності проекту МРГ-II «Енергоефективні технології та відновлювальні джерела енергії» червень 2012.
3. Sergiy Yevtushenko, Vladimir Vakht, Renewable energy in Ukraine, 2012.
4. Безруких П.П. Ветроэнергетика (справочное и методическое пособие) (2010).
5. Paul Breeze, The Anatomy of a Wind Turbine,2016.
6. T. Adefarati, R.C. Bansal, Energizing Renewable Energy Systems and Distribution Generation,2019.
7. S. Mathew, G.S. Philip, Wind Energy 2012.
8. M.A. Hyams, Wind energy in the built environment 2012
9. Leidy Tatiana Contreras Montoya, Miloud Rezkallah, Wind power plant planning and modeling 2021.
10. C.V. Nayar, H. Sharma, Power Electronics for Renewable Energy Sources 2011.
11. Твайделл Д. Возобновляемые источники энергии / Д.Твайделл, А.Уэйр. – М.: Энергоатомиздат, 1990. –390 с.
12. Амерханов Р.А. Проектирование систем энергообеспечения / Р.А. Амерханов. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 543 с.
13. Воронин С.М. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение. / С.М.Воронин, С.В Оськин., А.Н. Головко. – Краснодар, КубГАУ, 2006. – 267 с.
14. Бреусов В.П. Технологии преобразования нетрадиционных возобновляемых источников энергии / В.П. Бреусов. – СПб.: Нестор, 2001. 289 с.

15. Стычинский З. А. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н.И. Воропай. – Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Магдебург 2010. – 223 с.
16. Рензо Д.Ж. Ветроэнергетика: пер. с англ. / Д.Ж. Рензо – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352с.
17. Бурмистров А.А. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учеб. пособие / А.А. Бурмистров, В.И. Виссарионов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2009. –144с.
18. Голицын М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын, А.М. Голицын, Н.М. Пронина. – М.: Наука,2004. –157с.
19. Сибикин Ю.Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: Радиософт, 2009. – 229с.
20. 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.–42с.
21. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки.
22. В.П. Харитонов. – Москва: Изд. Академии сельхознаук, 2006. – 203 с.