

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОЗРОБКА ВІТРОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-42

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Семенович Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Семенович Денис Віталійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка вітрогенератора малої потужності

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «24» січня 2025 року № 4/7-51.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 14.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Спроектувати основні конструкційні елементи вітрової турбіни потужністю 0,5 - 2 кВт

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

1. Коротка історія вітрогенераторів
2. Складові елементи конструкції вітрогенератора
3. Опори та фундамент
4. Розрахунок лопатей
5. Очікувана продуктивність турбіни

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

1. 3-лопатева вітрова турбіна
2. Модель хабу
3. Відцентрова система гальмування
4. Гондола та механічні підсистеми
5. Вежа турбіни
6. Крива продуктивності для горизонтально-осьової 3-лопатевої турбіни
7. Ротор і хаб в зборі

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Коваль В.П., к.т.н., доц. зав. кафедри ЕІ</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

(підпис)

Семенович Д.В.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–42. - Т. : ТНТУ, 2025.

Стор. 71; рис. 34; табл. 2; креслень (презентацій) __; джерел 24.

Метою роботи є розробити вітрогенератор малої потужності до 2 кВт, призначений для зарядки акумуляторних батарей.

Результатом розробки в даній роботі є невелика вітрова турбіна потужністю 0,5 - 2 кВт, що виробляє електричну енергію. Її конструкція базується на 3-лопатевій вітровій турбіні з горизонтальною віссю, призначений для зарядки акумуляторних батарей у віддалених або ізольованих населених пунктах і житлових будинках. Турбіна використовує синхронний генератор для виробництва змінного струму, який потім інвертується в постійний і регулюється регулятором.

Турбіна спроектована для роботи на піковій швидкості обертання при швидкості вітру 9-10 м/с. Однак в реальності швидкість вітру повинна бути дещо вищою, щоб врахувати втрати в трансмісії та генераторі, а також недосконалість конструкції ротора і втрати на лопатях.

Ключові слова: Вітрогенератор, електроенергія, вітер

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Коротка історія вітрогенераторів	8
1.2 Необхідність розвитку відновлюваних джерел енергії.....	12
1.3 Вітрові турбіни	13
1.4 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Конструкція хабу.....	19
2.2 Складові елементи конструкції вітрогенератора	20
2.2.1 Особливості передачі крутного моменту від турбіни до електричної машини	20
2.2.2 Вали	21
2.2.3 Підшипники	21
2.2.4 Муфти.....	22
2.2.5 Пружини.....	22
2.2.6 Зчеплення та гальмівний механізм.....	23
2.3 Коробка передач	24
2.4 Відцентрова система гальмування	28
2.5 Вежа	31
2.6 Опори та фундамент	33
2.7 Висновки до розділу	36
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	37
3.1 Вплив швидкості вітру на роботу вітрогенератора	37
3.2 Потужність, що виробляється турбіною.....	39
3.3 Методика розрахунку енергетичних показників	40
3.4 Вплив аеродинаміки на роботу лопаті	43
3.5 Розрахунок лопатей.....	48
3.6 Очікувана продуктивність турбіни.....	50

3.7 Узагальнення результатів роботи	55
3.8 Висновки до розділу	60
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	61
4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання	62
4.3 Заходи, які зменшують небезпеку виникнення вибухів та пожеж.....	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Актуальність теми. У міру того, як населення Землі зростає в геометричній прогресії, а споживання ресурсів збільшується, виникає потреба у створенні стійких джерел енергії для задоволення наших енергетичних потреб. На даному етапі системи перетворення енергії вітру не можуть виробляти енергію в таких обсягах, як електростанції, що працюють на вугіллі або газі, але вони можуть функціонувати як автономні системи енергопостачання, зменшуючи потребу в лініях електропередачі на великі відстані. Автономні системи перетворення енергії вітру є надійним джерелом електроенергії для ізольованих громад, острівних громад або в тих випадках, коли вартість підключення до електромережі перевищує вартість установки та обслуговування систем перетворення енергії вітру. Невеликі системи перетворення енергії вітру можуть бути сконструйовані для:

- Підключення до існуючої електромережі.
- Заряджання акумуляторної батареї.
- Прямого живлення електроприладів.

Мета кваліфікаційної роботи: розробити вітрогенератор малої потужності до 2 кВт, призначений для зарядки акумуляторних батарей.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Описати основні типи вітрових турбін.
2. Описати будову вітронегенератора.
3. Описати конструкцію вежі турбіни.
4. Провести аналіз роботи лопатей та розглянуто вплив їх геометрії на ефективність перетворення енергії.
5. Розрахувати навантаження на кожну лопать.
6. Розрахувати продуктивність вітрогенератора.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Виконана згідно вимог [1]. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку

посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 71 арк. формату А4, графічна частина – ___ аркушів презентації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Коротка історія вітрогенераторів

Перетворювачі вітрової енергії не є новою технологією і використовувалися для переважно механічних застосувань, таких як дроблення зерна, з 644 р. н.е. Вітряки вперше були використані в стародавній області Сеістан (Персія, Афганістан), і примітивні машини все ще використовуються в цьому регіоні для переробки зерна сьогодні. Перші вітряки були турбінами з вертикальною віссю, які використовували вітрила навколо осі для створення механічної енергії. Через століття після того, як технологія перських вітряків була задокументована, до Європи дійшли новини про те, що китайці використовують вітряки для осушення своїх рисових полів. Чи використовували китайці вітряки або стоки вітряків ще до персів, сьогодні вже неможливо з упевненістю визначити. Цікаво, що китайський вітряк також являв собою бамбукову конструкцію з вертикальною віссю і вітрилами, подібну до перської системи.

Класичний вітрогенератор з горизонтальною віссю можна з упевненістю віднести до розробок європейських конструкторів, незалежно від східних систем з вертикальною віссю. Перше задокументоване історичне свідчення про вітряки з горизонтальною віссю датується 1180 роком, в якому розповідається про вітряк під назвою "*стовповий*" (рис.1.2) або "*естакадний*", що знаходився в голландській Нормандії. Звідти стовповий млин швидко поширився по всій Європі, а через два століття отримав подальший розвиток у вигляді баштового млина. У 16 столітті в Голландії був розроблений голландський вітряк (рис.1.1), який складався з млина з баштою, що оберталася, і лопатями ротора. Ця конструкція досі використовується на практиці в Нідерландах та інших європейських країнах для традиційних процесів помелу.

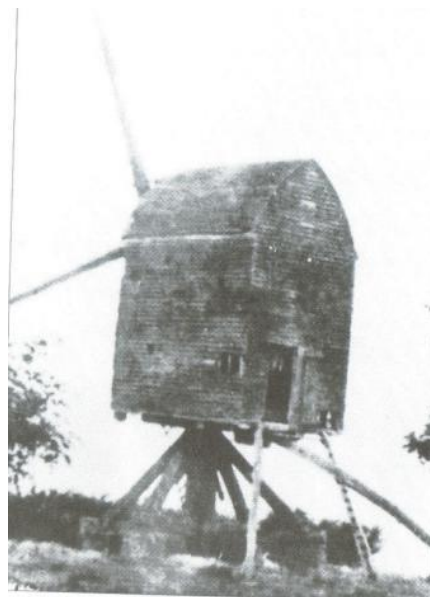


Рисунок 1.1 - Голландський баштовий млин Рисунок 1.2 -Стовповий млин

Американська вітрова турбіна (дизайн Halladay)

Коли технологія вітряків досягла свого піку в Європі на початку 19-го століття, проектування та будівництво вітряків також поширилося на територію, яку ми зараз називаємо Сполученими Штатами Америки, особливо на східному узбережжі, населеному британцями та голландцями. На середньому заході Америки виникла потреба у видобутку артезіанської води, щоб забезпечити поселенців джерелом для вирощування сільськогосподарських культур і худоби. Перше відповідне рішення проблеми видобутку води з'явилося в 1850 році, коли механік з Коннектикуту Деніел Галладей винайшов саморегульовану вітряну турбіну, яка не піддавалася руйнуванню навіть під час сильних вітрових буревіїв. Галладей розробив систему лопатей (рис.1.3), яка не була безпосередньо з'єднана з валом, а підвішена на кільцевій обоймі, що забезпечувало вільний рух лопатей і саморегулювання кута нахилу лопатей для безпечної роботи в умовах переважаючого вітру. Рух кільця викликався відцентровими силами, і кут нахилу лопатей збільшувався [2]

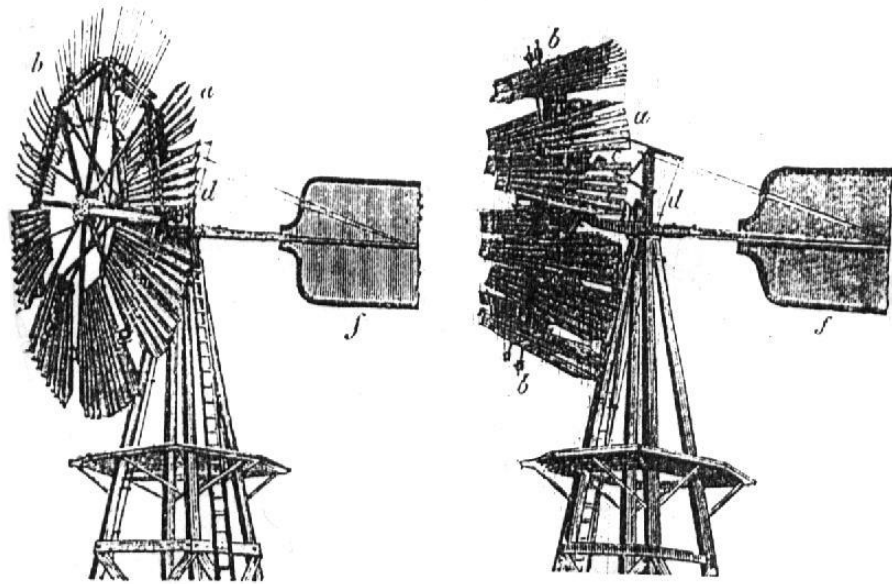


Рисунок 1.3 - Вітряк за проектом Галладея

Початкові етапи виробництва електроенергії з вітру

У 1882 році в Нью-Йорку була побудована перша в світі електростанція, яка виробляла близько 500 кВт електроенергії для використання в міських електромережах, що розвивалися. У 1891 році було запроваджено трифазний струм, а технологія електростанцій швидко розвивалася і давала змогу поступово збільшувати вихідну потужність. На початку двадцятих років більшість великих міст у промислово розвинених країнах були забезпечені електроенергією. Однак забезпечення електроенергією сільських районів виявилось дуже повільним процесом через великі відстані між електростанціями та районами, що приймали електроенергію. В очікуванні прибуття електрики в середньо-західний регіон, фермери цього регіону почали робити спроби запуснути електрогенератори за допомогою вітряків, які насправді були призначені для перекачування води.

Перша систематична розробка вітряка для виробництва електроенергії була здійснена в Данії датчанином Поулом Лакуром (Poul La Cour). Ла Кур побудував експериментальну вітрову турбіну, що приводила в дію динамо-машину, у 1891 році за сприяння данського уряду в надії забезпечити електроенергією сільські регіони Данії [3]. Водночас Ла Кур вирішив проблему

зберігання виробленої електроенергії, оскільки він використовував постійний струм для електролізу і зберігав газ водень, що утворювався під час цього процесу.

Вітрогенератори Ла Кура стали початком нової ери виробництва електроенергії, а його успіх був підкреслений, коли компанія Lykkegard почала промислову оцінку його розробок. Lykkegard розпочала виробництво вітрогенераторів, що генерують електроенергію за зразком розробок Ла Кура, на своїй випробувальній станції в Аскові. Зростання цін на паливо під час Першої світової війни призвело до прискорення виробництва вітрогенераторів, і до 1918 року в Європі працювало близько 120 вітрогенераторів, що виробляли електроенергію.

Турбіни La Cour Lykkegard вироблялися в діапазоні розмірів потужністю від 10 до 35 кВт. Конструкція включала лопаті вентилятора з жалюзі, які дозволяли залишатися нижче певної критичної межі швидкості обертання і працювати на безпечному рівні, а ризикання контролювалося двома хвостовими лопатями вентилятора. Електрогенератор був розміщений біля основи вежі і з'єднаний з валом ротора вертикальним приводним валом і проміжним редуктором [3].



Рисунок 1.4 -Турбіна La Cour Lykkegard, розміщена на будівлі.

Вітрова турбіна La Cour Lykkegard, що виробляє електроенергію, досягла загального ККД близько 22%, а на високопродуктивній ділянці річний вихід енергії склав близько 50 000 кВт·год.

1.2 Необхідність розвитку відновлюваних джерел енергії

Дослідження впливу вітроенергетичних проєктів на навколишнє середовище, *Environmental Impacts of Wind-Energy Projects* [4], висвітлює деякі важливі позитивні фактори, які підтримують розвиток вітроенергетичних станцій. Вітрові турбіни є життєздатним засобом виробництва енергії, оскільки вони можуть задовольнити наші потреби в енергії замість інших методів і не мають такого ж шкідливого впливу на навколишнє середовище. Вітрові турбіни не забруднюють повітря або воду забрудненими або токсичними побічними продуктами виробництва енергії. Безпосередньо їхня робота впливає лише на швидкість вітру безпосередньо за лопатями ротора. Однак інші організації звернули увагу на деякі негативні екологічні наслідки. До них відносяться візуальний ефект, який вони мають на людей, втручання в екосистему; птахи і кажани - на лопаті ротора, а також збільшення транспортної інфраструктури та ліній електропередач до місця розташування вітроелектростанції.

У звіті "Відновлювана електроенергія та енергосистема: виклик мінливості" [5] зазначено, що "показано, що невеликі обсяги виробництва електроенергії з таких джерел, як вітер, не створюють жодних експлуатаційних труднощів, оскільки вони не додають значної невизначеності у прогнозуванні балансу попиту і пропозиції". У звіті також прогнозується, що інтеграція вітрової енергії в енергосистему в глобальному масштабі становитиме близько 2 фунтів стерлінгів за МВт·год при 10% вітрової енергії, і зросте до 3 фунтів стерлінгів при 20 % вітрової енергії. Зважуючи переваги вітроенергетики та понесені витрати, стає очевидним, що вітроенергетика буде не лише сталою альтернативою, але й економічно життєздатною.

Австралія є одним з найбільших у світі споживачів викопного палива на душу населення. Це насамперед пов'язано з великими відстанями між нашими основними центрами та населеними пунктами. Разом з тим, Австралія визнана розвиненою країною, найбільш вразливою до зміни клімату та її негативного впливу на навколишнє середовище та екосистему. Стаття "Енергетична революція - перспективи сталої енергетики Австралії"[6], опублікована Грінпіс Інтернешнл, привертає увагу до нинішнього перехрестя, на якому опинилося людство у зв'язку зі зміною клімату. З часів промислової революції наша планета потеплішала на $0,74^{\circ}\text{C}$ в основному через спалювання вуглецевого викопного палива. Виклик, з яким ми стикаємося сьогодні, полягає в тому, щоб не допустити "втечі" кліматичних змін. На думку експертів з питань клімату, якщо глобальне потепління досягне 2° , це спричинить ще більше викидів, що неминуче виведе глобальне потепління з-під нашого контролю.

Всі природні джерела енергії разом узяті забезпечують у 3078 разів більше поточних світових енергетичних потреб. Завдяки сучасним технологіям ми можемо забезпечити в 5,9 разів більший світовий попит на енергію, і все це з природних джерел. Енергія вітру є 2-гою за величиною формою доступної відновлюваної енергії і за нинішніх технологій може забезпечити половину світових потреб в енергії.

1.3 Вітрові турбіни

Вітрові турбіни бувають різних конструкцій з різною потужністю та ефективністю, але всі вони перетворюють кінетичну енергію, що міститься в повітряному потоці, в механічну роботу. Найпоширенішим типом вітрогенераторів є вітрогенератори з горизонтальною віссю та кількістю лопатей від однієї до трьох. Автори у [7,8,9] стверджують, що трилопатеві вітрогенератори з горизонтальною віссю є найбільш придатними для стандартних вітрових умов, а також є найбільш естетично привабливими серед вітроенергетичних установок.

Існує також широкий спектр вертикальних вітрових турбін, які використовуються для виробництва електроенергії [10,11], однак жодна з них не може досягти такого високого коефіцієнта потужності, як горизонтальні конструкції. Вертикальні вітрогенератори спочатку були спроектовані для використання в якості роторів суто лобового типу, однак пізніше інженери переробили систему, щоб також використовувати аеродинамічну підйомну силу як джерело обертання. Найпоширенішим типом вітротурбін з вертикальною віссю є ротор Дар'є, який найкраще можна описати як турбіну, що нагадує принцип "мотузки, що крутиться". Конкретні переваги, пов'язані з вертикальною вітровою турбіною, як правило, пов'язані з простотою конструкції. Редуктор і генератор можуть бути розміщені на рівні землі, що також запобігає необхідності вбудовування в конструкцію системи регулювання ризику. Однак переваги вертикальної вітротурбіни також супроводжуються деякими серйозними недоліками, такими як низьке співвідношення швидкості вітроколеса до швидкості вітру, нездатність до самозапуску, а також неможливість контролювати вихідну потужність за допомогою самостійного нахилу лопатей.

Іншим різновидом ротора Дар'є є Н-ротор, який використовує прямі лопаті, з'єднані з вертикальною віссю за допомогою стійок, на відміну від вигнутих лопатей. Ще одна конструкція, можливо, найпростіша, - це ротор Савоніуса, який використовує 2 або більше лопатей у вигляді вітрових чашок. Ротор Савоніуса найчастіше використовувався для механічних застосувань, наприклад, для перекачування води або як вентиляційний механізм у вагонах поїздів.

Оскільки цей тип ротора не використовує жодного типу аеродинамічної підйомної сили, максимально досяжний коефіцієнт потужності становить 0,25. Загалом, завдяки своїй простоті, існує велика кількість різних роторів з вертикальною віссю, але через їх низький коефіцієнт потужності економічність цього типу механізмів є сумнівною. В даний час концепції роторів з

вертикальною віссю, як правило, не є конкурентоспроможними порівняно з вітрогенераторами з горизонтальною віссю.



Рисунок 1.5 - Ротор Дар'є

Найефективнішим і найпоширенішим типом вітрогенераторів сьогодні є вітрогенератори з горизонтальною віссю, які найлегше впізнати за конструкцією ротора, що нагадує пропелер [7,12,13]. Ця концепція, розроблена на основі європейського вітряка, зараз домінує у вітроенергетиці з точки зору дизайну, ефективності та досяжних коефіцієнтів потужності. Основними

Основними характеристиками, які зумовлюють перевагу в дизайні над аналогами з вертикальною віссю, є...

- Можливість контролювати частоту обертання ротора і вихідну потужність турбіни шляхом самостійного повороту лопатей навколо їх поздовжньої осі, що забезпечує їх безпечну роботу, а також виживання при сильному вітрі і екстремальних погодних умовах.
- Аеродинамічна конструкція лопатей ротора відіграє важливу роль у досягненні більш високого коефіцієнта потужності, і тільки завдяки цьому аспекту можна досягти вдвічі більшої ефективності, ніж у більшості вертикальних вітрогенераторів при аналогічних швидкостях вітру.
- У конструкції турбіни передбачена система рискання, яка дозволяє їй визначати напрямок вітру і пристосовуватися до нього, щоб забезпечити максимальне поглинання енергії вітру.

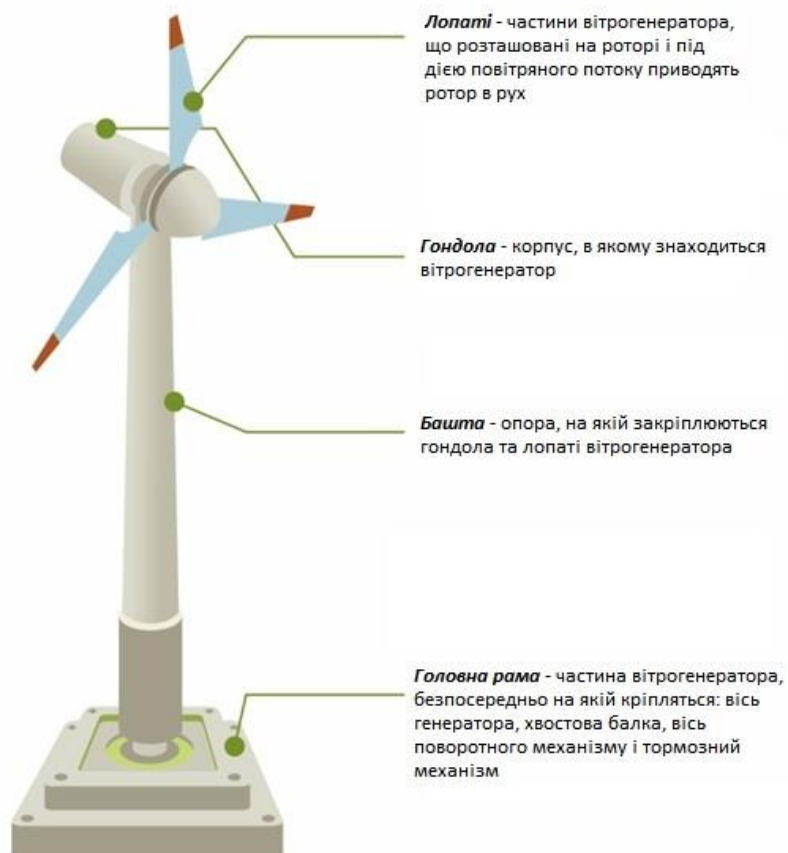


Рисунок 1.6 - 3-лопатева вітрова турбіна

Трилопатеві вітрогенератори з вертикальною віссю (рис.1.6) є найпоширенішим типом вітрогенераторів, що виробляють енергію [14]. Однак

вертикальним вітрогенераторам потрібна лише одна тонка лопать, щоб вловлювати енергію вітру. Для ефективного обертання диска ротора однолопатеві турбіни повинні обертатися з більшою швидкістю, ніж їхні 2- та 3-лопатеві аналоги. Це зменшує передавальне число, необхідне для передачі, а отже, масу і вартість коробки передач. Прихильники стверджують, що оскільки одна лопать коштує дешевше, ніж 2 або 3, однолопатеві ротори забезпечать оптимальну технічну економію.

Однак економічна ефективність - не єдиний фактор, який слід враховувати. Дволопатеві турбіни часто використовуються з міркувань статичного балансу. Трилопатеvim турбінам надається перевага перед одно- або дволопатеvими, оскільки вони забезпечують більшу динамічну стабільність. Ротори з трьома лопатями також є більш ефективними, ніж одно- або дволопатеvі турбіни, завдяки аеродинамічним втратам на кінчиках лопатей. Нижче наведено порівняння загальних ККД різних типів конструкцій турбін. При занадто високому співвідношенні швидкостей на кінці лопатей робота 2-лопатевої турбіни і ротора Дар'є стає неконтрольованою і небезпечною. Видно, що трилопатева вітротурбіна дає найвищий ККД при контрольованих швидкостях вітру.

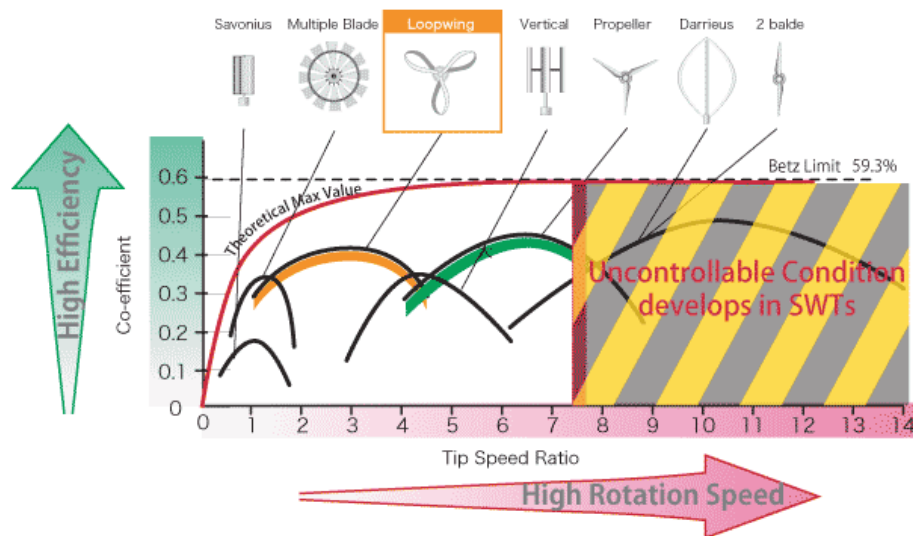


Рисунок 1.8 - Порівняння максимальної ефективності різних вітрових турбін (джерело: Loop wing)

Очевидно, що для досягнення максимально досяжної ефективності

найбільш ефективним варіантом є система з трьома лопатями ротора. Беручи це до уваги, конструкція вітротурбіни потужністю 1-5 кВт базуватиметься на технології, що використовується для розробки трилопатевої системи.

1.4 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз історичних аспектів розвитку вітроенергетики світу.
2. Обґрунтовано необхідність розвитку відновлюваних джерел енергії, а саме енергії вітру для зменшення використання викопних видів палива та викиду CO₂.
3. Описано основні типи вітрових турбін та наведено їх порівняльну характеристику.
4. Обґрунтовано використання у даній роботі трилопатевого вітроколеса.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Конструкція хабу

Хаб призначений для кріплення лопатей до приводного валу. У хабі окремі лопаті утримуються у потрібному положенні завдяки силі тертя (рис.2.1). Він повинен бути виготовлений з суцільного нейлонового блоку 220 мм діаметром (рис.2.2), через відносно невелику вагу та доступність матеріалу. Компоненти спочатку повинні бути роз'єднані (передня і задня частини хабу), а потім встановлені на вал, де зовнішній діаметр обточений до кінцевого розміру. Потім втулка з прикріпленим хабом повинна бути встановлена на горизонтальну ділильну головку, де циліндричний профіль просвердлений на її периферії з інтервалом 120 градусів. Потім по всій втулці просвердлені отвори 6 x 10,5 мм для розміщення 6 болтів М10, що відповідають за зусилля стискання вузла.

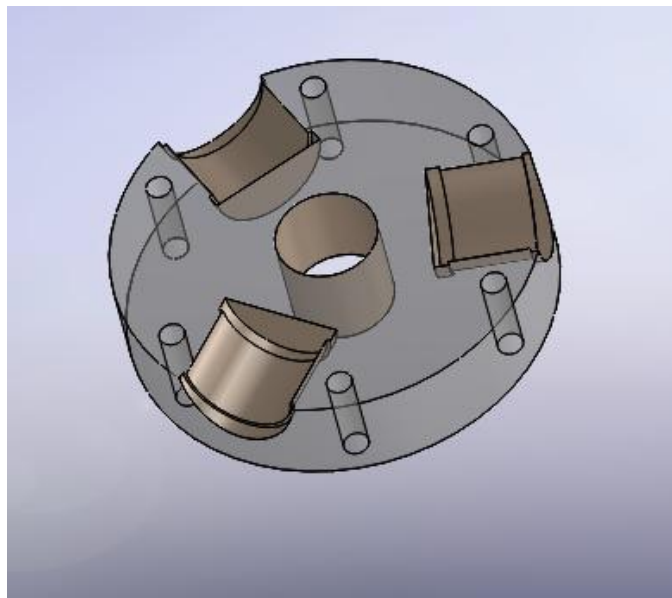


Рисунок 2.1 – Модель хабу



Рисунок. 2.2 – Нейлоновий хаб

2.2 Складові елементи конструкції вітрогенератора

2.2.1 Особливості передачі крутного моменту від турбіни до електричної машини

Зазвичай швидкість обертання ротора великої вітрової турбіни, що виробляє енергію, становить 25-50 об/хв, однак вона варіюється в залежності від розміру турбіни. Синхронні генератори для використання у вітрогенераторах працюють на швидкості 750-3600 об/хв. Для забезпечення необхідної швидкості обертання ротора синхронного генератора для ефективного перетворення енергії необхідно використовувати систему передач.

Тип системи передач і конфігурація залежить від обраної синхронної швидкості синхронних генераторів. Чим нижча синхронна швидкість, тим краще, оскільки це вимагає нижчого передавального відношення і, як наслідок, меншого вхідного крутного моменту. У редукторних системах вхідна швидкість висока, а на виході низька і крутний момент високий. Оскільки ми реверсуємо цикл і підвищуємо передачу для досягнення більш високих швидкостей обертання, крутний момент буде основним фактором, який буде визначати ефективну функціональність системи передач. Привід вітрової турбіни складається з комбінації різних машинних елементів, які діють як механічний передавач енергії до генератора.

2.2.2 Вали

Вали - це циліндричні компоненти, призначені для обертання і передачі крутного моменту між елементами машини. Вали присутні в різних частинах конструкції вітрової турбіни і механічного приводу. Ступиця турбіни обертається навколо валу ротора, який передає крутний момент на редуктор. У редукторі є кілька валів, які несуть шестерні різного розміру з метою збільшення швидкості обертання, яка передається генератору, в якому працює ще один вал. Цей вал є ротором асинхронного генератора, і його обертання безпосередньо відповідає за виробництво номінальної вихідної електричної потужності. Всі згадані вали постійно перебувають під навантаженням кручення, і в процесі проектування цього елемента машини необхідно враховувати втомні напруження. Через характер обертання валів вони мають резонансні власні частоти на "критичних швидкостях", тому слід уникати роботи на цих швидкостях, щоб запобігти надмірній вібрації. Матеріал валів варіюється залежно від застосування та навантаження, але загалом вали виготовляються зі сталі з високою міцністю на розрив, наприклад, сталь 4140, а потім піддаються термічній обробці та поверхневому загартуванню, щоб забезпечити механічну цілісність валів.

2.2.3 Підшипники

Підшипники - це механічні компоненти, призначені для зменшення тертя між двома компонентами, що знаходяться у відносному русі один відносно одного, як правило, при обертанні. Підшипники бувають найрізноманітніших конструкцій залежно від відносного напрямку і величини навантаження. Більшість підшипників, що використовуються у вітрогенераторах, встановлюються на різні вали в редукторі та трансмісії. Підшипники для таких високошвидкісних застосувань, як правило, є шарикопідшипниками, роликопідшипниками або конічними роликопідшипниками і призначені для

сприйняття радіальних навантажень, а також приблизно 30% осьових навантажень. Однак у машині використовуються й інші типи підшипників, наприклад, осьовий упорний підшипник, який підтримує гондолу та її обертання навколо турбінної башти. Осьові упорні підшипники дозволяють обертатися на низьких швидкостях в умовах високих осьових навантажень.

Підшипники зменшують тертя між двома елементами у відносному русі, зменшуючи площу контакту між двома поверхнями. Наприклад, кульковий підшипник складається з декількох полірованих загартованих сталевих сфер (кульок), які обертаються між внутрішньою і зовнішньою доріжками, на кожній з яких є канавка, що спрямовує і обмежує рух кульок до двовимірного обертання. Кульки рівномірно розділені металевою обоймою, яка запобігає їхньому контакту та перешкоджанню руху одна одної.

2.2.4 Муфти

Муфти - це елементи машин, призначені для з'єднання двох валів з метою передачі крутного моменту між ними. Муфти використовуються у вітрогенераторах для з'єднання валу ротора з вхідним валом редуктора, а також для з'єднання вихідного валу редуктора з ротором генератора. Муфти бувають різних конструкцій: болтові фланцеві муфти, шпонкові втулкові муфти, демпферні гнучкі муфти, муфти зчеплення і шліцьові муфти, і це лише деякі з них. Вибір муфти залежить від навантаження та характеру передачі крутного моменту: постійне, змінне, ударне навантаження тощо.

2.2.5 Пружини

Пружини знаходять різноманітне застосування у вітрогенераторах, особливо в системах з пасивним приводом, таких як пружинні гальма, поворотні пружини для механізмів регулювання кроку лопатей, демпфери нахилу або відбійники в механізмах зчеплення. Пружини діють як пружини

розтягування, стиснення або кручення і отримали свою назву завдяки природній тенденції повертатися у вихідний стан, коли на них діє сила. Ця тенденція обумовлена природою матеріалу, з якого виготовлені пружини. Зазвичай використовується пружинний дріт, який намотується у вигляді спіралі, щоб досягти бажаної форми і коефіцієнта пружини для її застосування.

2.2.6 Зчеплення та гальмівний механізм

Зчеплення - це механізми передачі крутного моменту, які залежать від активації. Таким чином, зчеплення є додатковими механізмами, які активують певні функції машини. Одним з найпоширеніших типів зчеплення є колодкове зчеплення. Цей тип зчеплення працює шляхом ініціювання контакту між поверхнею, що обертається, і колодками зчеплення. Накладки, як правило, виготовляються з матеріалу з відносно високим коефіцієнтом поверхневого тертя і термостійкими властивостями. Високий рівень тертя між двома поверхнями призводить до з'єднання двох елементів і до того, що сторона зчеплення приймає характер руху сторони приводу. Наприклад, зчеплення може використовуватися у вітровій турбіні для активації механізму повороту лопатей, коли швидкість обертання турбіни досягає певної швидкості. Потім муфта вмикається і активує механізм повороту лопатей, змушуючи турбіну продовжувати працювати в безпечних умовах. Зчеплення, як правило, застосовується за допомогою тиску пружини, а у вітрових турбінах зазвичай активується за допомогою електромеханічного механізму: наприклад, надмірна швидкість, зафіксована датчиком обертання валу, викликає спрацювання електромагніту і вмикає зчеплення.

Гальма також використовуються у вітрогенераторах для регулювання швидкості обертання турбіни. Вони можуть бути у вигляді механічних фрикційних гальм або навіть гальм опору, розташованих на кінчику лопаті ротора. Механічні лопаті активуються муфтою і прикладають силу, що обмежує швидкість обертання валу ротора. Гальма опору, як правило, мають

форму плоских пластин, які регулюються таким чином, щоб збільшити силу опору на лопаті ротора, зменшуючи швидкість обертання турбіни.

2.3 Коробка передач

Очікувана робоча швидкість роторної системи при номінальній швидкості вітру 12 м/с становить приблизно 180 об/хв. Генератор, що використовується, має номінальну робочу швидкість 1000 об/хв. Тому для забезпечення номінальної швидкості роботи генератора була розроблена коробка передач, що підвищує швидкість.

Зубчасті передачі - це зубчасті елементи, які передають обертальний рух від одного вала до іншого. Серед різних способів передачі потужності, а саме шестерні, ремені та ланцюги, шестерні є найбільш надійними та довговічними. Коефіцієнт корисної дії зубчастих передач становить близько 98%, і вони не страждають від прослизання, як ремінні передачі. Однак шестерні, як правило, є найдорожчим варіантом з усіх вищезгаданих механізмів передачі. Це пов'язано з вартістю матеріалів, відносно великою тривалістю циклу обробки, а також допусків на обробку, яких необхідно дотримуватися для забезпечення ефективної роботи та передачі потужності.

Основна вимога до геометрії зуба шестерні полягає в тому, щоб співвідношення кутових швидкостей у всіх точках окружності зуба було точно рівним. Відхилення від цього співвідношення призведе до механічної інтерференції, порушення зачеплення, що в кінцевому підсумку призведе до підвищеного зносу і катастрофічного виходу з ладу. Геометрія зубчастого колеса описується на модульній основі, що впливає з відносного розміру і конфігурації евольвент, які використовуються для побудови профілю зубчастого колеса.

Модуль зубчастого колеса визначається як діаметр окружності кроку в міліметрах, поділений на кількість зубів. (кількість міліметрів діаметра кроку на зуб)

Коробка передач була розроблена для збільшення швидкості обертання з приблизно 180 об/хв до приблизно 1000 об/хв. Було зрозуміло, що на вході в редуктор не завжди буде 180 об/хв, отже, на виході не завжди буде рівно 1000 об/хв. Однак, виходячи з очікуваної номінальної швидкості, було прийнято рішення створити коробку підвищеної швидкості з передавальним числом 1:6 (рис.2.3 і 2.4).

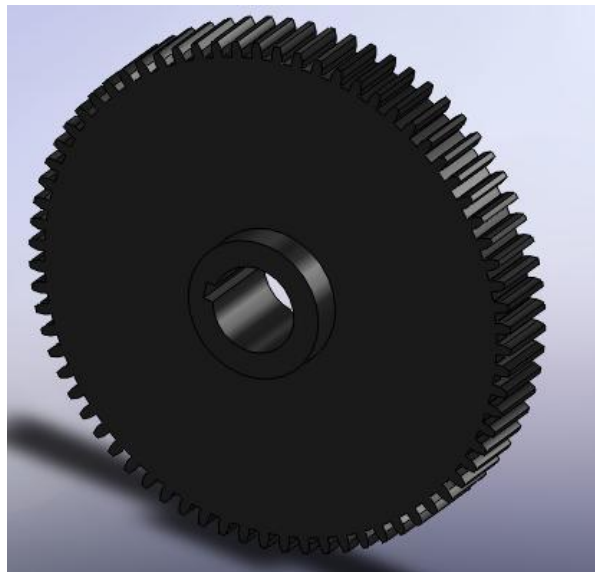


Рисунок 2.3 - 72-зубчаста циліндрична шестерня

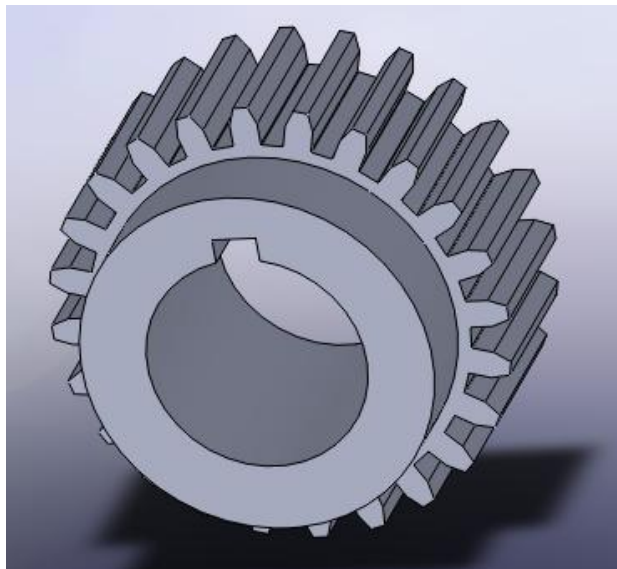


Рисунок 2.4 - 24-зубчаста циліндрична шестерня

Було обрано дві шестерні з модулем 2 різних розмірів. Передавальне відношення між двома шестернями становить 1:3, тобто 1 оберт великої 72-зубчастої шестерні обертає малу 24-зубчасту шестерню 3 рази. Шестерні були розроблені з внутрішнім діаметром 25,0 мм, щоб, відповідно, працювати на паралельних валах діаметром 25,0 мм. Для механічної передачі обертання на вал і фіксації шестерень у їхніх взаємних положеннях на валу використовується шпонковий паз діаметром 6 мм. Матеріал шестерні – сталь 4140, високоміцна термооброблювана сталь, що піддається термообробці. Після того, як шестерні оброблені до кінцевих допусків, вони піддаються наскрізному загартуванню - процесу термічної обробки, який забезпечує рівномірне зчеплення по всій довжині шестерні. Після наскрізного загартування застосовується азотування - метод поверхневого зміцнення, який підвищує твердість поверхні деталей та їхню зносостійкість.

Корпус редуктора так само важливий, як і самі зубчасті колеса, і в цій конструкції акцент робиться на допуски геометрії, зазначені у виробничих кресленнях. Корпус редуктора не тільки закриває систему зачеплення, захищаючи її від сміття, яке може забруднити мастило, але також є каркасом, на який встановлюються підшипники. Центри підшипників є критичним фактором в конструкції редуктора. Неправильне вирівнювання центрів підшипників значно впливає на ефективність роботи редуктора, а також призводить до передчасного виходу з ладу самих підшипників. Неспіввісність не тільки створює нерівномірне навантаження на підшипники, але й, як наслідок, впливає на зачеплення шестерень на валу трансмісії. Циліндричні шестерні спроектовані таким чином, що під час роботи вони контактують лише в одній точці. Неправильне вирівнювання призведе до того, що точка контакту буде знаходитися в певній точці на зубі шестерні, а не буде розподілена по всій ширині зуба. Це призведе до нерівномірного зносу і, якщо він стане досить сильним, спричинить поломку зуба. Поломка зуба в кінцевому підсумку призводить до подальших поломок, оскільки відламані шматки металу

заважають зачепленню шестерень і призводять до заклинювання або зламу зуба.

Щоб звести до мінімуму неспіввісність, допуск на всі компоненти, що складають корпус редуктора, становить $\pm 0,01$ мм.

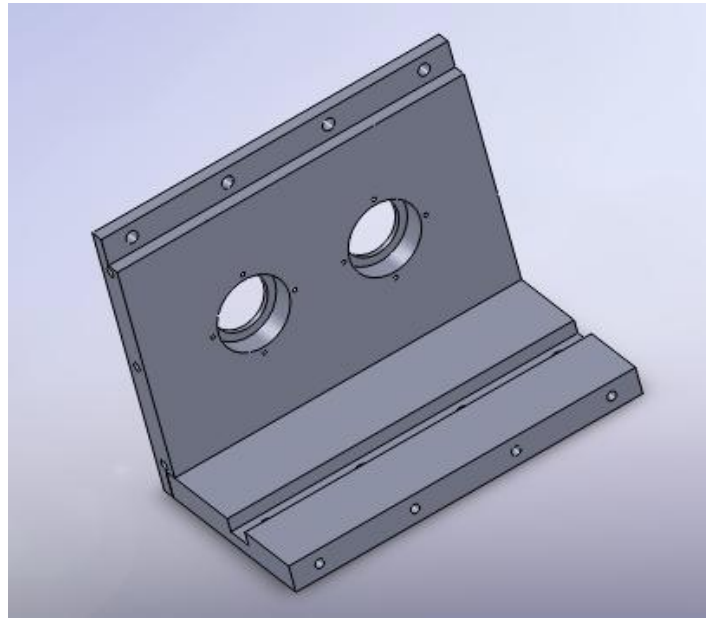


Рисунок 2.5 – Корпус редуктора

На початкових етапах створення прототипу корпус редуктора складатиметься з низки плоских алюмінієвих пластин, які збираються таким чином, щоб створити корпус у комплекті з необхідними корпусами підшипників, виточеними у відповідних пластинах. Пластини будуть виготовлені з суцільного алюмінію з корпусом підшипника, різьбовими отворами, які слугуватимуть кріпленням для фіксаторів підшипників, а також різьбовими отворами та бортиками, які слугуватимуть опорними точками для збірки всієї коробки. Алюміній має високе співвідношення міцності до ваги і стійкий до атмосферних впливів, що робить його ідеальним матеріалом для корпусу редуктора. Якщо проект перейде до стадії виробництва, корпус редуктора буде перероблений на литий, що знизить загальну вартість виробництва агрегату.

Фіксатор підшипника - це компонент, який фіксує підшипник в осьовому напрямку і запобігає його вислизанню з корпусу підшипника. Корпуси

підшипників, як правило, обробляються до того ж розміру, що і зовнішній діаметр підшипника, іноді навіть з невеликим натягом. Якщо зазор занадто великий, то це в кінцевому підсумку вплине на термін служби підшипників через попереднє навантаження на підшипник. Точна посадка, як правило, забезпечує належну фіксацію підшипника без його ковзання в корпусі. Однак, щоб цього не сталося, використовуються фіксатори підшипників. Фіксатори підшипників, як правило, мають форму стопорних кілець (рис. 2.6), однак ця конструкція включає нейлонову шайбу, яка кріпиться на зовнішній поверхні корпусу підшипника, що також виконує функцію ущільнення.

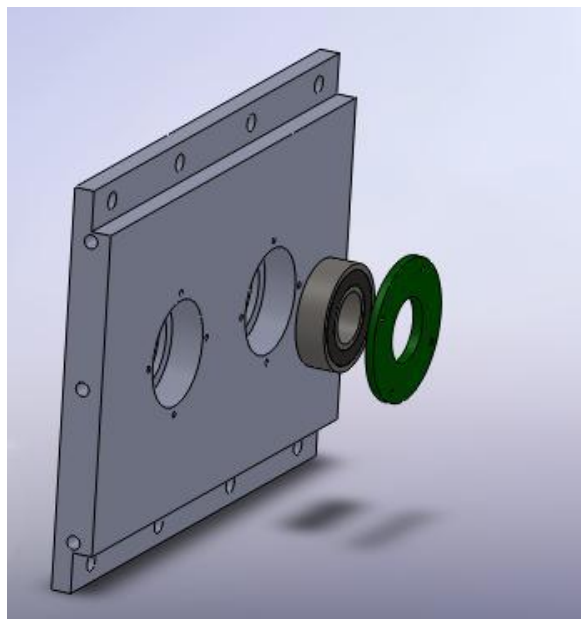


Рисунок 2.6 - Підшипник та утримуюча пластина/ущільнення

2.4 Відцентрова система гальмування

Відцентрова система гальмування є механізмом регулювання швидкості ротора і приводного механізму. Номінальна швидкість ротора турбіни становить 180 об/хв, що призводить до швидкості обертання ротора генератора 1080 об/хв. Очікується, що через втрати, пов'язані з зубчастим зачепленням і навантаженням генератора, швидкість генератора рідко перевищуватиме 1000 об/хв, однак переривання існує для того, щоб ротор не перевищив номінальну швидкість і не зазнав катастрофічної поломки.

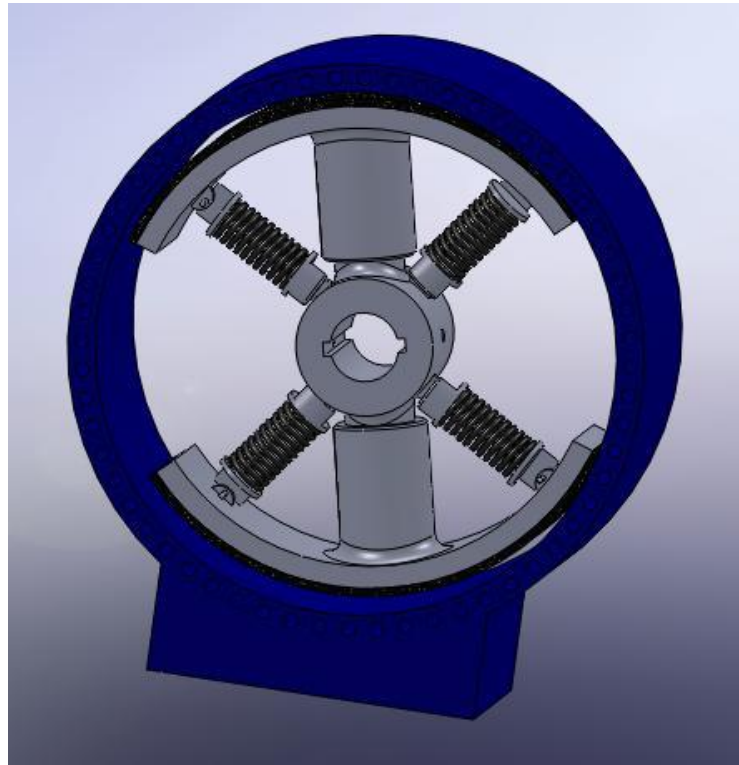


Рисунок 2.7 - Відцентрова система гальмування

Гальмівна система працює між редуктором і генератором на вихідному валу редуктора (рис. 2.7). У нерухомому положенні гальмівні колодки розташовані на відстані 5 мм від корпусу вимикача в радіальному напрямку. Гальмівні колодки утримуються в положенні чотирма натяжними пружинами. Коли пристрій починає обертатися, відцентрова сила, що виникає під дією маси гальмівних колодок, змушує пружини натягуватися. Зі збільшенням швидкості обертання зростає і напруження пружин.

Гальмівні колодки можуть вільно входити і виходити з центральної втулки, обмежуючись лише натяжними пружинами. Пристрій сконструйовано таким чином, що при досягненні швидкості обертання 1000 об/хв гальмівні колодки контактують з корпусом гальма, викликаючи фрикційний контакт і, по суті, підтримуючи швидкість вихідного валу на рівні 1000 об/хв.

Тертя під час подрібнення призводить до нагрівання корпусу молотка. Щоб протидіяти ефекту нагрівання і ефективно відводити теплову енергію, кришка мотогондоли була спроектована з повітрязабірниками, які спрямовують потік зустрічного повітря безпосередньо на відбійний барабан. Цикл

примусової конвекції відводить тепло від барабана і скидає його через сітчасту захисну пластину в хвостовій частині турбіни.

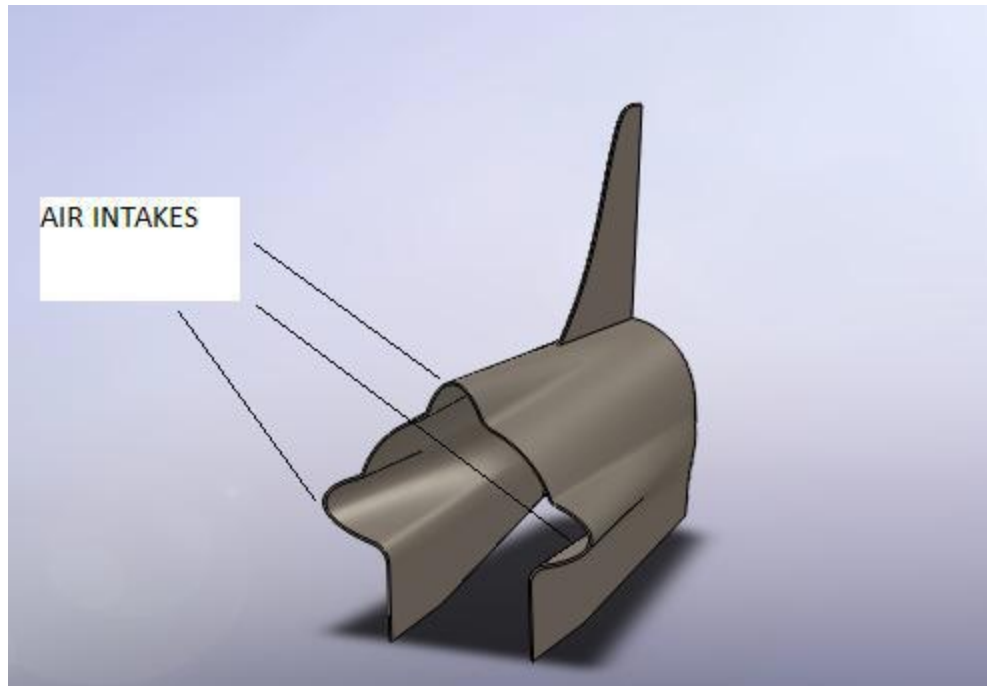


Рисунок 2.8 - Кришка мотогондоли з повітрязабірниками для ефективного охолодження системи гальмування

Кришка мотогондоли - це склопластиковий корпус, відформований з використанням двоосьової сітчастої тканини. Двохосьова сітчаста тканина забезпечує міцність у двох напрямках і є поширеним матеріалом, що використовується для армування дощок для серфінгу. Хвостова частина турбіни вбудована в корпус мотогондоли. Хвіст або ребро відповідає за контроль рискання гондоли. Рискання - це здатність турбіни підлаштовуватися під напрямок зустрічного вітру і розташовувати ротор безпосередньо на його шляху. Кришка кріпиться болтами безпосередньо до корпусу редуктора, що забезпечує її жорстку фіксацію на корпусі турбіни.

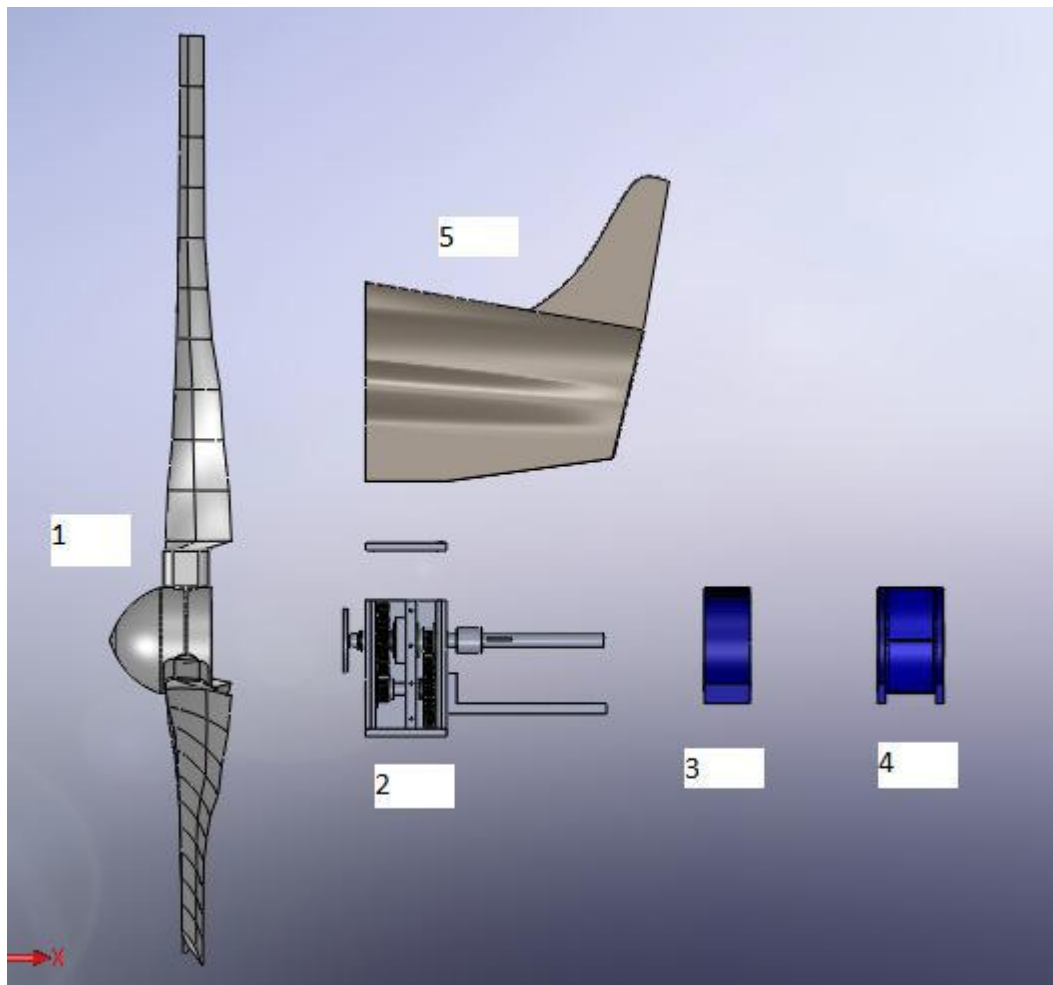


Рисунок 2.9 - Гондола та механічні підсистеми

1. Роторна система - первинний рідинно-кінетичний перетворювач в механічний
2. Коробка передач і привід зі швидкістю 1:6
3. Регулятор відцентрової частоти обертання
4. Індукційний генератор
5. Кришка мотогондоли

2.5 Вежа

Завдяки відносно невеликим розмірам турбіни, вона може бути встановлена на різних існуючих конструкціях, таких як дахи, резервуари для дощової води та оглядові майданчики. Мета вежі - забезпечити відстань між лопатями і землею та розмістити турбіну в трубі безперервного потоку.

Малі турбіни, як правило, встановлюються на будівельних вежах, подібних до тих, що використовуються для водонасосних вітряків, оскільки вони можуть бути зібрані з нуля і коштують відносно дешево. Недоліком таких веж є їхня естетична привабливість. Великомасштабні турбіни, що виробляють енергію, зазвичай розміщуються на великих конічних бетонних або сталевих стовпах. Стовпи набагато оптично привабливіші (рис. 2.10)



Рисунок 2.10 - Вежа турбіни

Вежа, що використовується в цьому конкретному проекті, являє собою конічну сталеву вежу з покриттям, прикріплену до землі за допомогою фланцевої пластини, яка анкерує її до бетонного фундаменту. Вежа забезпечує захист ліній електропередач від генератора до інвертора на рівні землі, пропускаючи проводку через серцевину вежі.

Було вирішено створити вежу, яку можна було б встановити на фундамент, а не на існуючу конструкцію. Проектування вежі, яка б

монтувалася на існуючу платформу, залежало б від конструкції платформи і повністю залежало б від ситуації.

Матеріалом для вежі була обрана м'яка сталь з покриттям через її доступність та відносно низьку ціну. Однак кращим матеріалом є волокнистий композитний матеріал з високим співвідношенням міцності до ваги і стійкістю до шкідливих кліматичних впливів.

Опора вежі буде механічно закріплена на бетонному фундаменті за допомогою серії з 16 шпильок M20, які виступають з фундаменту.

Вежа спроектована з використанням м'якої сталі з покриттям, оскільки вона відносно дешева порівняно з іншими марками сталі, її покриття робить її стійкою до атмосферних впливів і має механічні властивості, що дозволяють підтримувати турбіну навіть в умовах екстремальних навантажень.

Ми сподівалися спроектувати вежу з використанням волокнистого композиту, що зробить її повністю корозійностійкою, непровідною і набагато легшою у зведенні завдяки її легкій вазі.

2.6 Опори та фундамент

Проект і рекомендації щодо фундаменту та опор турбіни базуються на принципах проектування фундаментів і шахт, визначених у [15]. Конструкція фундаменту турбіни розрахована на широкий спектр типів ґрунтів і рельєфу місцевості і була обрана через її простоту і відповідність конструкції турбіни і вежі.

По-перше, стовбур (яма, в яку заливається фундамент) буриться, а не забивається палями. Бурові шахти формуються шляхом виїмки ґрунту або за допомогою шнека, який видаляє ґрунт із землі і формує порожнину шахти. Пальові фундаменти використовуються для відносно глибоких фундаментів, де сталеві елементи забиваються в ґрунт і закріплюють фундамент на землі. Бурунабивний фундамент був обраний тому, що він має багато переваг для цього конкретного застосування, а саме:

- Одиночна паля може бути використаний на відміну від групи паль.
- Буріння шахт у щільних піщано-гравійних відкладеннях простіше, ніж забивання паль.
- Завдяки тому, що основа просвердленого валу може бути збільшена, він забезпечує більший опір підйомному навантаженню.
- Економічніше, ніж використання обладнання для забивання паль.
- Забезпечують високу стійкість до бічних навантажень.

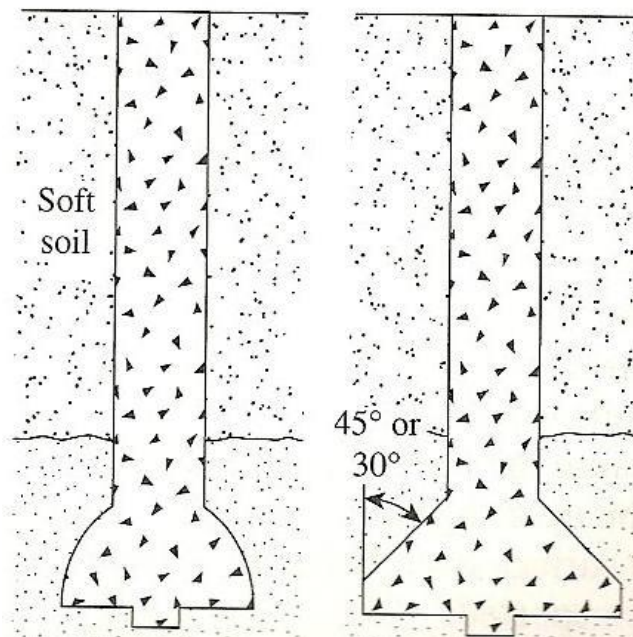


Рисунок 2.11 - Фундамент бурової шахти з дзвоновим дном

Фундамент являє собою бетонно-щебенеvu суміш з розтрубом під кутом 30° для підвищення стійкості до бічних сил і підйому. Діаметр шахти становить 700 мм і містить сталеву арматуру та сталеве кільце, до якого приварені анкерні шпильки М20. Це забезпечує точку анкерування для вежі.

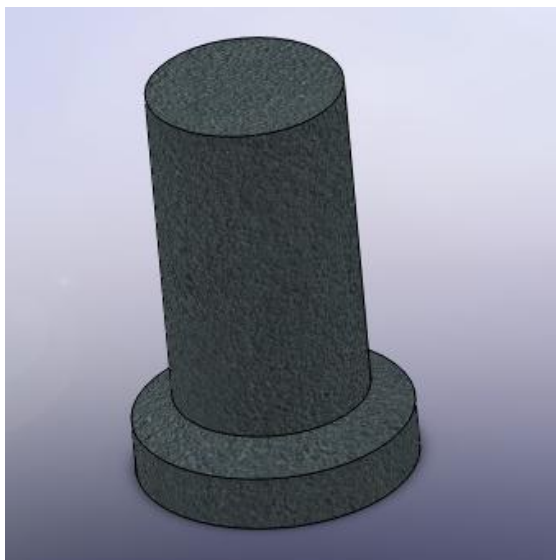


Рисунок 2.12 - Бетонний фундамент



Рисунок 2.13 - Сталеві арматурні та анкерні шпильки

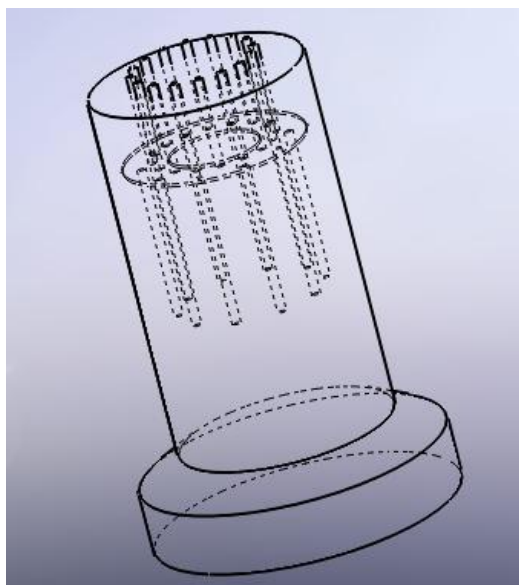


Рисунок 2.14 - Фундамент з армуванням

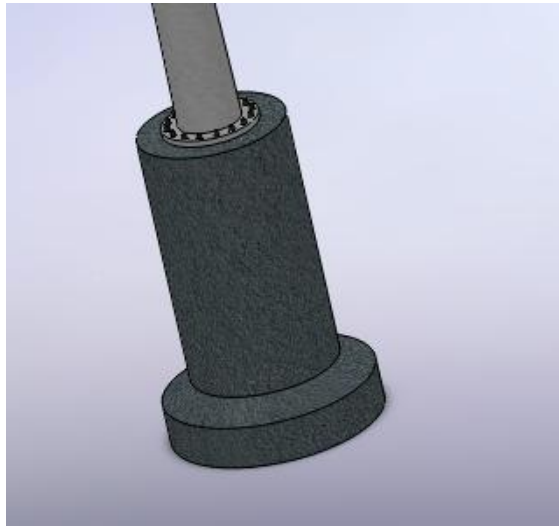


Рисунок 2.15 - Фундамент + вежа

Тип фундаменту може відрізнятися залежно від місця розташування. Простий і ефективний фундамент для таких конструкцій, як невелика вітрова турбіна, - це пробурена кругла шахта з підрізом у вигляді дзвону в нижній частині.

2.7 Висновки до розділу

1. Обґрунтовано конструкцію хабу, який призначений для кріплення лопатей до приводного валу.
2. Обґрунтовано загальну будову гондоли вітронегенератора.
3. Наведено опис коробки передач і відцентрованої системи гальмування. Описано наступні елементи конструкції вітрогенератора: вали, підшипники, муфти, пружини, зчеплення та гальмівний механізм.
4. Описано конструкцію вежі турбіни, опор та фундаменту для її монтажу.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вплив швидкості вітру на роботу вітрогенератора

Швидкість вітру в місці передбачуваної установки вітрогенератора є одним з основних визначальних факторів, що впливають на вибір типу турбіни: вертикальна вісь, горизонтальна вісь, конфігурація лопатей тощо. Наприклад, у місцевості з відносно низькою середньою швидкістю вітру може бути застосована система з декількома вентиляторами типу Halladay на протилагу ротору з 3 лопатями через кращу продуктивність вентилятора при меншому співвідношенні швидкості вітру до швидкості обертання наконечника.

При виборі конкретного типу конструкції слід враховувати не тільки середню швидкість вітру, але й розподіл швидкості вітру протягом тривалого періоду часу. Також слід враховувати, що швидкість вітру змінюється з висотою, щоб правильно оцінити можливі місця розташування, а також конкретний тип турбіни, що підходить для цього місця.

Глобальні вітри спричинені різницею в поглинанні сонячної радіації по всій сферичній поверхні Землі, що призводить до різниці тиску. Вітер рухається в напрямку від високого до низького тиску, так само, як тепло - від високої до низької температури. Земля поглинає більшу кількість сонячної радіації на екваторі, ніж на полюсах. Варіації вхідного випромінювання створюють області конвективної активності в тропосфері, нижній частині атмосфери. Утворений в результаті потік створює циркуляцію вітрів, що піднімаються на екваторі і опускаються до полюсів. На циркуляцію атмосфери значний вплив має швидкість обертання Землі, а також сезонні зміни в розподілі сонячного випромінювання.

Зміна температури, яка змушує тепле повітря підніматися в екваторіальних регіонах, протидіє гравітаційній силі, що діє на нього. Це призводить до того, що вітер рухається переважно в горизонтальній площині і реагує на зміну горизонтальних градієнтів тиску. Окрім атмосферного тиску та

гравітаційних сил, на поведінку атмосферного вітру впливають тертя земної поверхні, інерція вітру та швидкість обертання Землі [16].

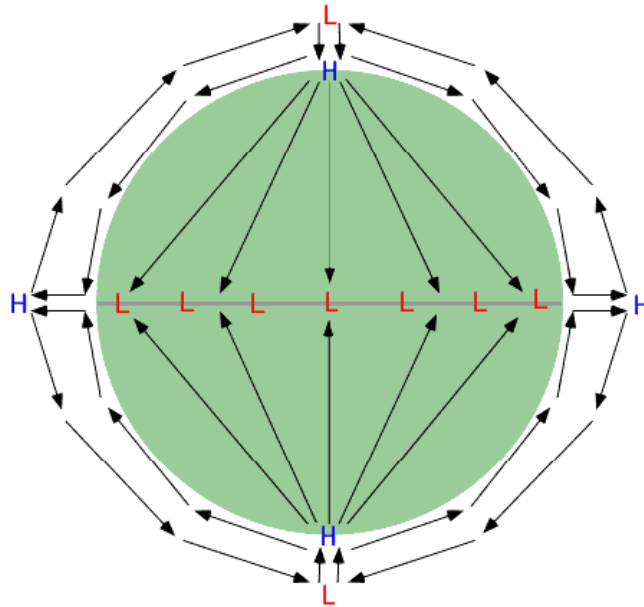


Рисунок 3.1 – Спрощені однокамерні глобальні схеми циркуляції повітря [16]

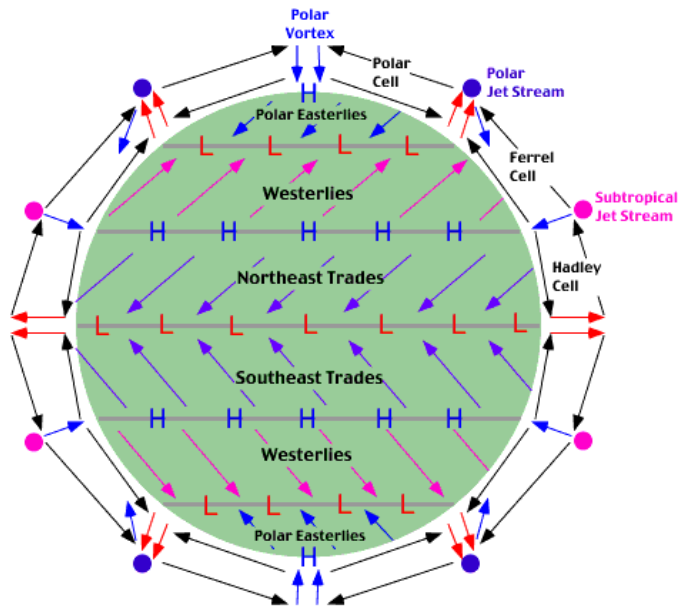


Рисунок 3.2 – Спрощена глобальна схема циркуляції повітря в трьох шарах поверхні та верхніх шарах атмосфери [16]

Швидкість вітру змінюється з висотою і може бути апроксимована наступною залежністю:

$$u = Vin \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \quad (3.1)$$

де u - горизонтальна швидкість;
 z - висота в метрах;
 z_0 - довжина;
 d - висота нульової площини;
 V - характеристична швидкість.

Вимірювання швидкості вітру часто проводяться з еталонної висоти. Наступний степеневий вираз можна використовувати для зв'язку швидкості вітру на певній висоті з опорною швидкістю на певній опорній висоті.

$$u = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{b'} \quad (3.2)$$

Де u_{ref} - швидкість у точці відліку;
 z_{ref} - опорна висота;
 b' - коефіцієнт завад (для відкритих майданчиків).

3.2 Потужність, що виробляється турбіною

Розглядаючи робочий об'єм для лопатей турбіни, сума сил, що діють на робоче середовище, описується наступним лінійним виразом для моменту імпульсу:

$$\sum F_x = \int_{cs} u \rho \bar{u} \cdot d\bar{A} = \dot{m} u_2 - u_0 \quad (3.3)$$

Підписи 0 вказують на швидкість проти течії, 2 - на швидкість за течією
 ρ - густина робочого середовища;
 $\dot{m}$ - масова витрата.

Циліндричний потік, що проходить через систему лопатей турбін, розширюється, на відміну від звуження, яке відбувається на межі розділу лопатей. Сила, яку відчують лопаті турбін, буде спрямована у напрямку

потoku (напрямку вітру) і дорівнюватиме осьовій силі, яка діє на робоче середовище,

$$F_A = \dot{m} u_0 - u_2 \quad (3.4)$$

Масова витрата робочого середовища позначається наступною залежністю:

$$\dot{m} = \rho_0 u_0 A_0 = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (3.5)$$

У цьому випадку густина робочого середовища підтримується на постійному рівні по всьому потоку. Підрядковий індекс 1 вказує на характеристики на межі лопаті турбіни.

Потужність може бути виражена як сила помножена на швидкість, а потужність, що виробляється турбіною, може бути виражена як:

$$P_T = F_A u_1 = \dot{m} u_0 - u_2 u_1 \quad (3.6)$$

3.3 Методика розрахунку енергетичних показників

Рівняння енергії для нестиснутого робочого середовища має вигляд

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} u^2 + gh = C_L \quad (3.7)$$

C_L — константа вздовж лінії потоку

Якщо є якісь втрати енергії, то співвідношення можна переписати

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2} u_0^2 + gh_0 = p_2 + \frac{1}{2} u_2^2 + gh_2 + P_p \quad (3.8)$$

P_p — питома енергія, вилучена з потоку робочого середовища

Оскільки енергія поглинається лопатями ротора і перетворюється на механічну потужність, наступна формула відображає потужність, що відводиться від потоку робочого середовища:

$$E_p = \frac{1}{2} \dot{m} u_0^2 - u_2^2 \quad (3.9)$$

де E_p - питома енергія.

З точки зору потужності:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} u_0^2 - u_2^2 \quad (3.10)$$

де P – потужність.

Комбіновані рівняння енергії імпульсу

Потужність, що виводиться з потоку, а отже, і потужність турбіни, можна записати як :

$$P_T = \dot{m} u_0 - u_2 \quad u_1 = \frac{1}{2} \dot{m} u_0^2 - u_2^2 , \quad (3.11)$$

$$u_0^2 - u_2^2 = u_0 + u_2 \quad u_0 - u_2 . \quad (3.12)$$

Це означає, що

$$u_1 = \frac{1}{2} u_0 + u_2 . \quad (3.13)$$

Фактор перешкод (а) - це дробова зміна швидкості вітру на турбінній станції. Цей фактор визначається як:

$$a = \frac{u_0 + u_1}{u_0} . \quad (3.13)$$

Потужність турбіни також може бути виражена як функція площі, яку охоплюють лопаті, швидкості вітру і щільності робочого середовища, в нашому випадку - щільності повітря.

$$P_T = 4a (1-a)^2 \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^3 . \quad (3.14)$$

Це також можна записати як,

$$P_T = C_p P_0, \quad (3.15)$$

де C_p - коефіцієнт потужності турбіни

$$C_p = 4a(1-a)^2, \quad (3.16)$$

де P_0 - кінетична потужність у трубі незбуреного потоку, площа якої дорівнює A_1 :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^3. \quad (3.17)$$

Рівняння тяги турбіни

Осьова сила або тяга, яка діє на турбіну, отримується шляхом поєднання швидкості вітру з площею охоплення турбіни і щільністю повітря разом з фактором перешкод в наступній залежності:

$$F_A = 4a(1-a) \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^2, \quad (3.18)$$

$$F_A = C_F \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^2, \quad (3.19)$$

де C_F - коефіцієнт осьової сили,

$$C_F = 4a(1-a). \quad (3.20)$$

Крутний момент

Максимальний крутний момент виникає, коли максимальна тяга прикладена до лопатей турбіни, кінчики яких знаходяться на радіусі R від центру хабу. Максимальне зусилля або осьова тяга виникає при коефіцієнті завад $a = 0,5$, $C_F = 1$ і $F_A = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^2$. Максимальний крутний момент виражається як:

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^2 R, \quad (3.21)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^3 \frac{R}{u_0}, \quad (3.22)$$

$$T_{\max} = P_0 \frac{R}{u_0} . \quad (3.23)$$

Фактичний крутний момент, що розвивається лопатями, менший за максимальний і може бути отриманий шляхом множення максимального крутного моменту на коефіцієнт крутного моменту. Коефіцієнт крутного моменту залежить від типу конструкції та системи ротора, що використовується.

$$T = C_T T_{\max} , \quad (3.24)$$

де C_T - коефіцієнт крутного моменту.

Механічна потужність, що виробляється турбіною, може бути пов'язана з крутним моментом, що генерується,

$$P_T = T\omega , \quad (3.25)$$

$$P_T = C_T T_{\max} \omega , \quad (3.26)$$

де ω - кутова швидкість турбіни, виражена в (рад/с).

3.4 Вплив аеродинаміки на роботу лопаті

Конструкція лопатей турбін є, мабуть, найбільш математичним елементом всієї конструкції турбіни. Лопаті використовують аеродинамічну підйомну силу, щоб забезпечити поворотний момент і, відповідно, вхідний крутний момент для редуктора. Існує багато різних стандартизованих профілів аеродинамічних лопатей, що відрізняються за поперечним перерізом і можуть бути найбільш впізнавано охарактеризовані за вигином, товщиною і довжиною хорди. Конструкція лопатей, що використовуються в цьому проєкті, базуватиметься на теорії елементів лопаті та рівнянні Беца і розглядатиме форму лопаті для ідеальних лопатей з обертанням і без обертання за вітром.

Для характеристики аеродинамічного профілю використовуються такі терміни:

- *Середня лінія вигину* - розташування точок на половині шляху між верхньою і нижньою поверхнями профілю крила.
- *Передня кромка* - найбільш передня точка поперечного перерізу крила.
- *Задня кромка* - хвостова частина поперечного перерізу крила (кромка лопаті).
- *Лінія хорди* - лінія хорди з'єднує передню і задню кромки. Лінія хорди - це пряма лінія, а відстань до неї відома як хорда c аеродинамічного крила.
- *Кривизна* - це відстань між лінією хорд і точкою, яка представляє середню лінію вигину, виміряну перпендикулярно до лінії хорд.
- Товщина аеродинамічного полотна в будь-якій точці вздовж його хордової лінії - це відстань між верхньою і нижньою поверхнею, виміряна перпендикулярно до хордової лінії.
- *Кут атаки (α)* - Кут атаки - це кут, утворений між лінією хорди і відносним напрямком вітру.
- *Проліт* - Термін "проліт" відноситься до довжини аеродинамічного полотна, перпендикулярного до поперечного перерізу. З точки зору вітрової турбіни проліт лопатей дорівнює діаметру розмаху турбіни мінус діаметр хабу.

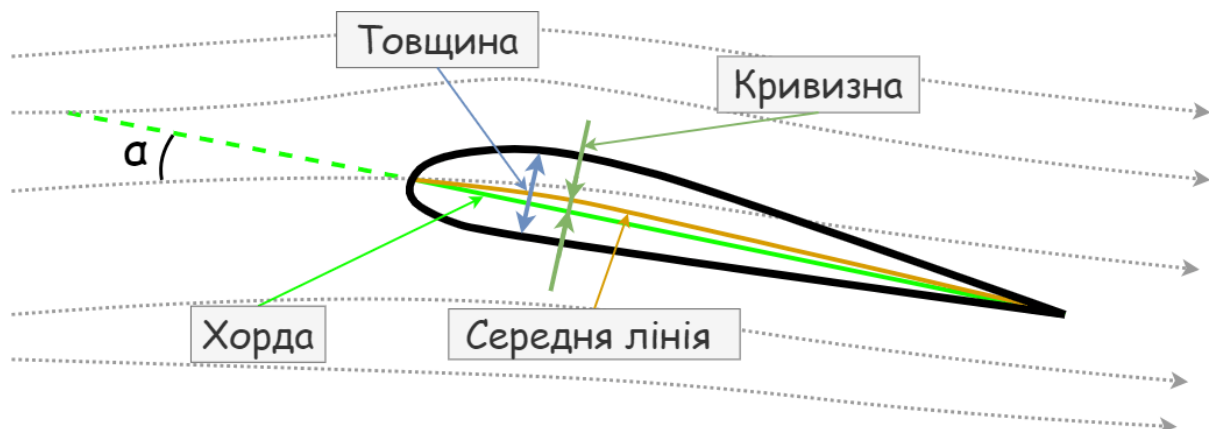


Рисунок 3.3 - Номенклатура аеродинамічних крил

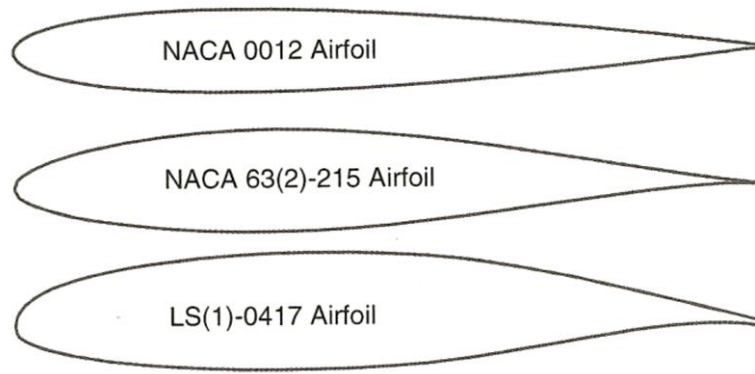


Рисунок 3.4 - Профілі крила

Профілі аеродинамічних крил, показані на рис. 2.4, є трьома найпоширенішими поперечними перерізами аеродинамічних крил, що використовуються у вітрових турбінах. NACA - це Національний консультативний комітет з аеронавтики, який розробляє аеродинамічні профілі для крил літаків, деякі з них також знаходять застосування як відповідні перерізи лопатей турбін.

Чотиризначна система нумерації NACA - це метод класифікації конструкції аеродинамічного крила на основі його вигину, хорди і товщини.

Наприклад, NACA 2320 (теоретичний номер) має максимальний вигин 2% на відстані 30% довжини хорди від передньої кромки при максимальній товщині 20% хорди. NACA 0012, показаний на рисунку 3.4, є асиметричним аеродинамічним крилом. Перші дві цифри 0 означають, що воно не має вигину, а 12 - максимальну товщину 12% від довжини хорди.

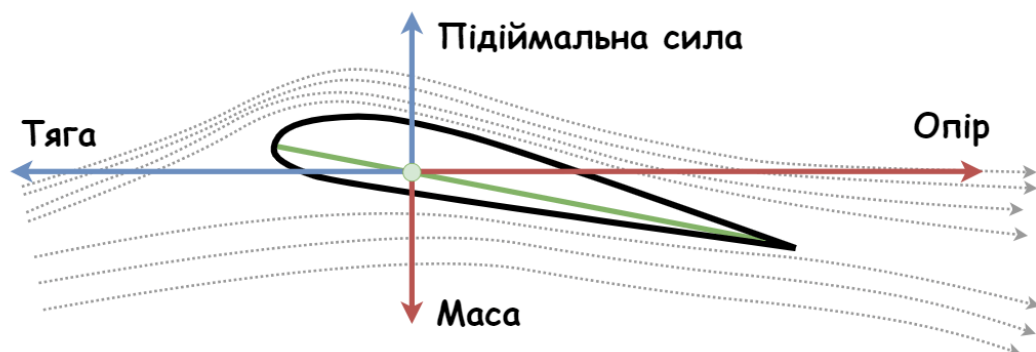


Рисунок 3.5 - Сили опору та підйомна сила

Підйомна сила і лобовий опір - це сили, які відповідають за обертання лопатей і створення механічної енергії. Коли повітря протікає через поперечний переріз аеродинамічного крила, воно створює нерівномірний розподіл сил по поверхні аеродинамічного крила. Потік повітря над опуклою (верхньою) поверхнею рухається з більшою швидкістю, ніж повітря, що обтікає увігнуту (нижню) поверхню. Підвищена швидкість потоку над опуклою поверхнею призводить до зниження тиску, що створює всмоктування на цій стороні аеродинамічної поверхні. Повітря, що рухається повільніше на увігнутій стороні, стороні тиску, створює позитивну силу на поверхні аеродинамічної плівки, яка також додає до підйомної сили, створюваної стороною всмоктування.

Підйомну силу можна визначити як силу, що діє перпендикулярно до напрямку зустрічного потоку. Підйомна сила - це результуюча сила різниці тиску між верхньою і нижньою межами поперечного перерізу аеродинамічного екрану. Сила лобового опору - це сила, що діє паралельно напрямку зустрічного потоку. Сила лобового опору є результатом сил в'язкого тертя, що створюються в прикордонному шарі аеродинамічного крила, а також різниці тиску, що існує між передньою і задньою кромками.

Багато проблем течії можна охарактеризувати за допомогою безрозмірних параметрів потоку (табл. 3.1). Число Рейнольдса, яке вказує на те, чи є система течії турбулентною або ламінарною, є найважливішим безрозмірним параметром. Коефіцієнти сили і моменту, як правило, є функцією числа Рейнольдса і можуть бути визначені як для 2-, так і для 3-вимірних об'єктів. При проектуванні лопаті зазвичай використовуються двовимірні розрахункові коефіцієнти, оскільки проліт аеродинамічного крила можна розбити на кілька поперечних перерізів, які аналізуються окремо. Секції аеродинамічного крила зазвичай випробовуються в аеродинамічних трубах з різними кутами атаки і швидкостями потоку, що в кінцевому підсумку впливає на число Рейнольдса.

Таблиця 3.1 - Безрозмірні коефіцієнти, які використовуються у
розрахунках

$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{Сила інерції}}{\text{Сила в'язкості}}$	Число Рейнольдса: Характеризує ступінь течії
$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Підйомне зусилля / довжина}}{\text{Динамічна сила / довжина}}$	Коефіцієнт підйомної сили: Коефіцієнт сили, перпендикулярної до напрямку потоку
$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Сила опору / довжина аер}}{\text{Динамічна сила / довжина}}$	Коефіцієнт опору: Коефіцієнт сили, паралельної напрямку потоку
$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 A c} = \frac{\text{Момент хитання}}{\text{Динамічний момент}}$	Коефіцієнт кренячого моменту: Коефіцієнт моменту, індукованого потоком на проектованій площі аеродинамічного покриття
$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{\text{Статичний тиск}}{\text{Динамічний тиск}}$	Коефіцієнт тиску
$\frac{\varepsilon}{L} = \frac{\text{Висота шорсткості поверхні}}{\text{Довжина корпусу}}$	Коефіцієнт шорсткості поверхні

Вигнуті аеродинамічні крила мають вигнуту хордову лінію, що дозволяє їм створювати підйомну силу при нульовому куті атаки. Вигнуті аеродинамічні крила зазвичай мають більш високе максимальне відношення підйомної сили до лобового опору, ніж симетричні аеродинамічні крила для позитивних кутів атаки, що робить їх сприятливими для застосування у вітроенергетичних перетворювачах.

З цієї причини в проектованій в цій роботі конструкції буде застосовано злегка вигнуте аеродинамічне крило, щоб забезпечити максимальну підйомну силу і ефективне вилучення енергії з потоку повітря. Обрана конструкція відповідає профілю NACA4412, яка широко використовується у

вітрогенераторах для перетворення вітрової енергії.

3.5 Розрахунок лопатей

Розрахунки навантаження на кожную лопать були зроблені для максимальних екстремальних умов експлуатації, щоб забезпечити механічну цілісність лопатей при очікуваному експлуатаційному навантаженні.

Для виготовлення лопатей можна використати дерево – дуб. Механічні характеристики дуба:

Щільність: 750 кг/м³.

Модуль міцності на розрив: 180 МПа.

Модуль пружності: 19,7 ГПа.

Лопать була змодельована з брус розміром 25 · 150 · 1250 мм, обмежена з одного кінця хабом з рівномірно розподіленим навантаженням, що діє на її поверхню 150 мм · 1250. У звичайних умовах експлуатації лопать не піддається повному навантаженню, як у цій моделі, через різницю в куті повороту лопаті.

Розрахунок сили опору

$$F_D = C_D 0,5 \rho U^2 A , \quad (3.27)$$

де C_D – 2,05 коефіцієнт опору – (див. таблиця 9.3 [17]) $\rho = 1,21$ (повітря при 20° C);

U – швидкість;

A - площа поверхні.

$$F_D = 2,05 \cdot 0,5 \cdot 1,21 \cdot 20^2 \cdot 0,1875 = 93 \text{ Н} . \quad (3.28)$$

Лопать була змодельована у вигляді консолі, один кінець якої був повністю закріплений, а на її верхню поверхню було прикладено рівномірно розподілене навантаження 93 Н.

$$I = \frac{bh^3}{12} = 150 \cdot \frac{25^3}{12} = 19531,5 \quad (3.29)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6} 150 \cdot \frac{25^2}{12} = 15625 \quad (3.30)$$

$$\text{Максимальний прогин} = \frac{WL^4}{8EI}$$

$$\text{Максимальний прогин} = \frac{93 \cdot 1250^4}{8 \cdot 19,7 \cdot 10^9 \cdot 195312,5}$$

$$\text{Максимальний прогин} = 0,00737 \text{ м} \quad (3.31)$$

$$\text{Напруження на опорі} = \frac{WL}{2Z}$$

$$\text{Напруження на опорі} = \frac{93 \cdot 1250}{2 \cdot 15625}$$

$$\text{Напруження на опорі} = 3,72 \text{ МПа} \quad (3.32)$$

Напруження в основі лопаті становить 3,72 МПа. Модуль міцності на розрив матеріалу становить 180 МПа, тому лопать легко витримає навантаження від вітру швидкістю 20 м/с.

Таблиця 3.2 - Розподіл вигину та хорд лопаті [18]

Розподіл вигину та хорди для оптимальної форми				
r/R	Хорда, м	Кут повороту (град.)	Кут відносно вітру (град.)	Крок секцій (град.)
0,1	1,375	38,2	43,6	36,6
0,2	0,858	20	25,5	18,5
0,3	0,604	12,2	17,6	10,6
0,4	0,462	8	13,4	6,4
0,5	0,373	5,3	10,8	3,8
0,6	0,313	3,6	9	2
0,7	0,269	2,3	7,7	0,7
0,8	0,236	1,3	6,8	-0,2
0,9	0,21	0,6	6	-1
1	0,189	0	5,4	-1,6

3.6 Очікувана продуктивність турбіни

Як вже обговорювалося в попередніх розділах, коефіцієнт потужності ротора може бути отриманий за допомогою коефіцієнта інтерференції :

$$a = \frac{u_0 - u_1}{u_0} \quad (3.33)$$

Коефіцієнт інтерференції є мірою ефективності лопатей у поглинанні енергії в циліндрі потоку робочого середовища (повітря). Для досягнення коефіцієнта інтерференції турбіни необхідно, щоб швидкість навітряного і підвітряного вітру ротора була однаковою в певний момент часу.

Для того, щоб турбіна ефективно поглинала максимальну кількість енергії з циліндра потоку робочого середовища, повітря не повинно проходити через диск, створений роторною системою, не відхиляючись від лопатей. Якщо об'єм повітря проходить через зону, охоплену лопатями, не відхиляючись, то кількість енергії, що видобувається турбіною, дорівнюватиме нулю.

З рівняння, що пов'язує коефіцієнт завад з коефіцієнтом потужності:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.34)$$

Коефіцієнт потужності C_p досягає теоретичного максимуму 0,593, коли коефіцієнт завад a дорівнює 1/3.

Загальна продуктивність турбіни може бути охарактеризована ступенем зміни трьох основних показників - потужності, крутного моменту і тяги - в діапазоні різних швидкостей вітру. Зазвичай продуктивність турбіни виражається у вигляді безрозмірних графіків, за якими можна оцінити продуктивність будь-якої турбіни, незалежно від її експлуатаційної ситуації: постійне обертання, змінна частота обертання ротора тощо. Найчастіше коефіцієнт потужності C_p , коефіцієнт тяги C_T і коефіцієнт крутного моменту C_q вказуються як функції коефіцієнта швидкості кінчика лопаті λ .

Коефіцієнт швидкості кінчика лопаті описується як відношення швидкості на кінці лопаті турбіни до швидкості зустрічного вітру.

Крива продуктивності C_p від λ для трилопатевої вітротурбіни з горизонтальною віссю наведена на рис. 3.6

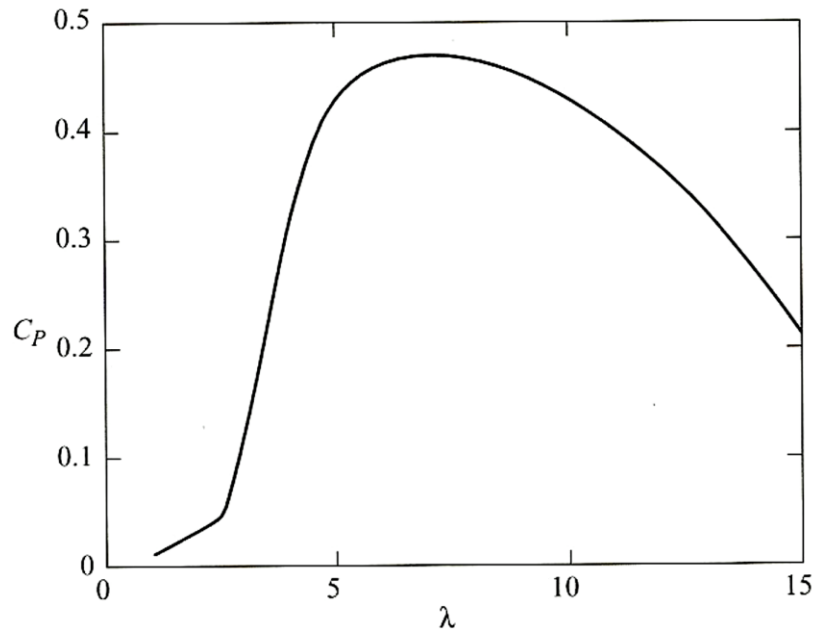


Рисунок 3.6 - Крива продуктивності для горизонтально-осьової 3-лопатевої турбіни [19]

На рис. 3.6 показано коефіцієнт потужності при різних значеннях коефіцієнта швидкості кінчика лопаті. Максимально досяжний коефіцієнт потужності становить 0,47. Це враховує аеродинамічні втрати наконечника через опір і звалювання. На рис. 3.6 показано криві потужності для лопатей без втрат, з урахуванням усіх втрат і без втрат на аеродинамічний опір і звалювання. Граничне значення коефіцієнта Беца 0,593 досягається, коли немає жодних втрат при $\lambda=7$. Однак в реальності втрати завжди будуть через недосконалість конструкції та процес виготовлення.

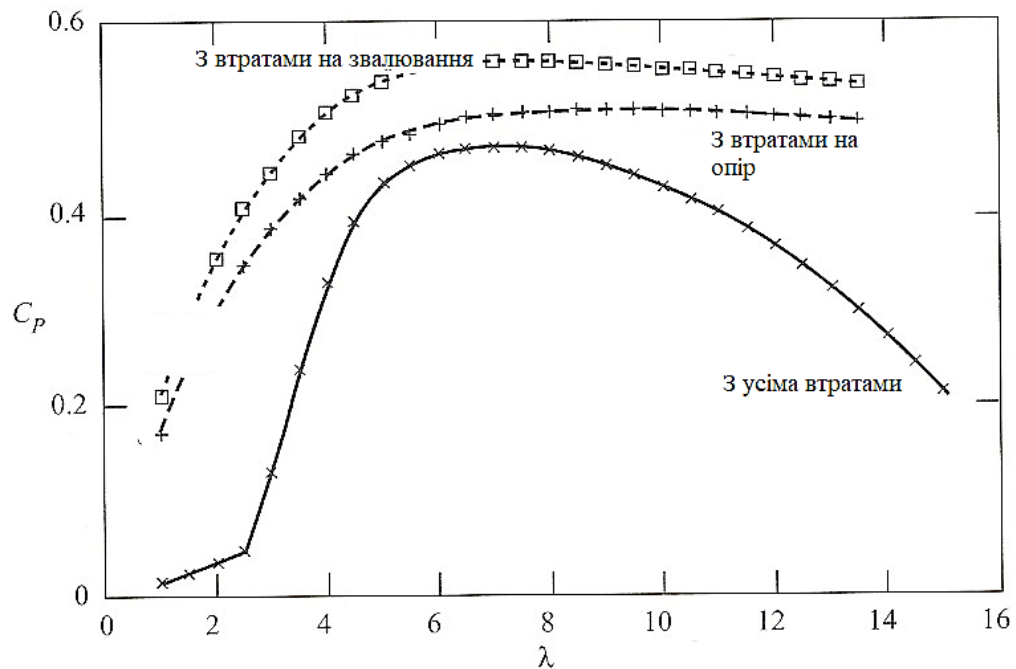


Рисунок 3.7 – Залежність C_p від λ , що враховує втрати [19]

Іншим параметром, що впливає на продуктивність вітрогенератора, є коефіцієнт площі. Коефіцієнт площі визначається як площа лопатей, поділена на площу, що охоплюється лопатями.

Коефіцієнт площі можна підвищити, збільшивши кількість лопатей в системі ротора. Його також можна змінити, збільшивши довжину хорди аеродинамічного крила.

На рисунку 3.8 показано вплив коефіцієнту площі на коефіцієнт потужності турбіни.

Високий коефіцієнт площі створює різкий пік при низьких і середніх співвідношеннях швидкості обертання кінця лопаті, що означає, що турбіна дуже чутлива до змін співвідношення швидкості обертання кінця лопаті.

З [19] випливає, що оптимальний коефіцієнт площі досягається при використанні 3 лопатей, оскільки коефіцієнт потужності залишається стабільним при збільшенні відношення швидкості наконечника до 4 після досягнення «пікового» значення.

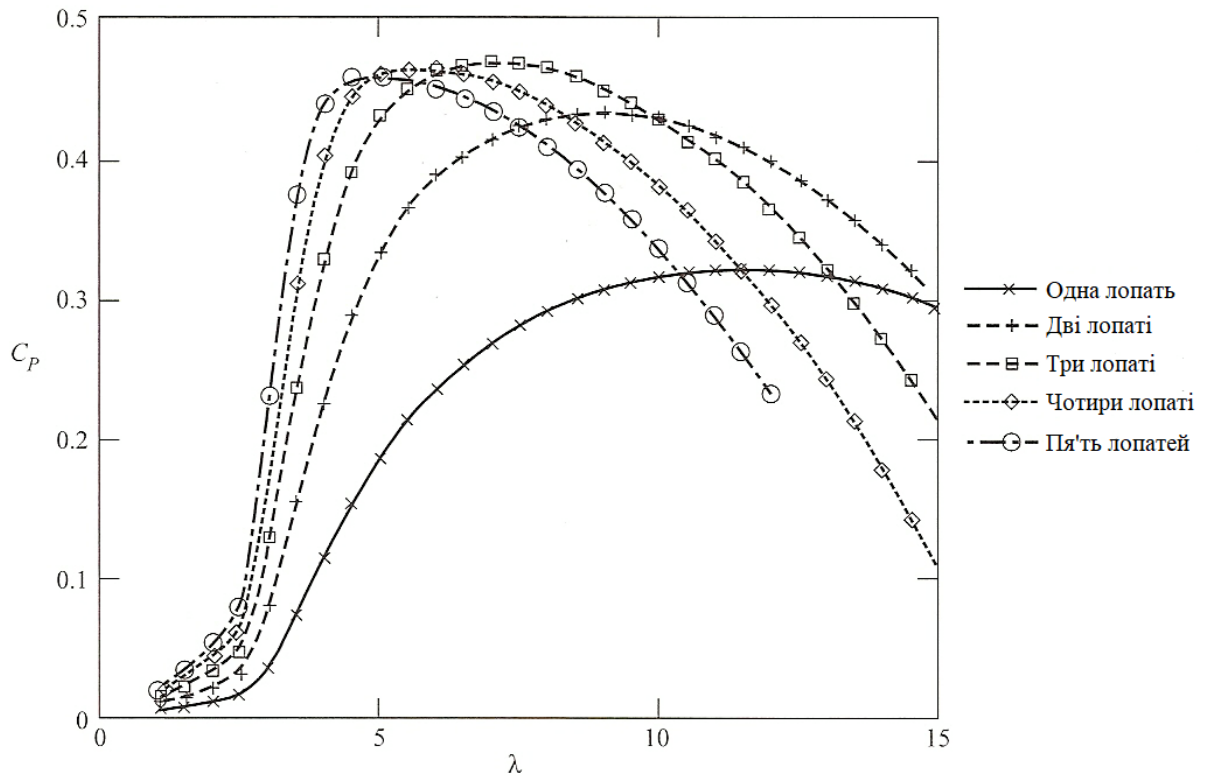


Рисунок 3.8 - Вплив кількості лопатей на коефіцієнт потужності [19]

Дві турбіни, які потребують високого коефіцієнту площі, - це механічні турбіни, що використовуються для перекачування води, і дуже маленькі турбіни, що використовуються для зарядки електричних батарей. Обидві ці турбіни потребують високого пускового моменту, який досягається лише за умови високого коефіцієнту площі. Це також дозволяє виробляти невелику кількість енергії навіть при низьких швидкостях вітру, що також вигідно для зарядки акумуляторів [20-23].

Коефіцієнт крутного моменту C_p не є корисним для оцінки продуктивності турбіни, він просто використовується для визначення типу редуктора, який використовується в системі механічної передачі. Коефіцієнт крутного моменту визначається шляхом ділення коефіцієнта потужності C_p на коефіцієнта швидкості кінчика лопаті λ .

Для турбін, що виробляють електроенергію, низькі коефіцієнти крутного моменту є сприятливими, оскільки основна увага приділяється високій швидкості обертання. Однак для турбін, що потребують високого пускового моменту, більш високий коефіцієнт крутного моменту є кращим. Вищий

коефіцієнт крутного моменту є необхідний для конструкції вітрогенератора, що проектується в даній роботі, оскільки це редукторна система, яка використовується в основному для заряджання акумуляторів. Високий коефіцієнт крутного моменту дозволяє генерувати електроенергію навіть при низьких швидкостях вітру. При низькій швидкості вітру генератор буде "повільно" заряджати батарею, тоді як при високій швидкості він буде виробляти постійний, корисний запас енергії. Завдяки використанню регулятора в колі зарядки, коли батарея повністю заряджена, надлишкова енергія подається (скидається) в систему гарячого водопостачання або на інше існуюче навантаження.

Проведемо розрахунки

$$\lambda = 2,618$$

Коефіцієнт площі :

$$s = \frac{\text{площа лопаті}}{\text{територія, що очищається}} \quad (3.35)$$

$$s = \frac{3 \cdot 1,25 \cdot 0,13}{\pi \cdot 1,25^2}$$

$$s = 0,099$$

Оскільки $s = 0,099$, то отримаємо відносно високий коефіцієнту крутного моменту. Типове значення для трилопатевої турбіни, взяте з [19], становить близько 0,035.

Беручи до уваги високу міцність, теоретичний коефіцієнт крутного моменту можна наближено визначити. Передбачуваний коефіцієнт крутного моменту $C_Q = 0,1$

Використовуючи рівняння для крутного моменту, що створюється турбіною при вітрі 6 м/с :

$$T = C_Q \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot u_0^2 \cdot R ,$$

$$T = 0,1 \cdot 133,64 , \quad (3.36)$$

$$T = 13,364 \text{ Нм},$$

Потужність турбіни при вітрі 6 м/с може бути рівна:

$$\begin{aligned} P_T &= T\omega, \\ P_T &= 13,364 \cdot 12,5664, \\ P_T &= 167,94 \text{ Вт} . \end{aligned} \quad (3.37)$$

Потужність потоку повітря рівна:

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,5 \rho A u_0^3, \\ P_0 &= 641,47 \text{ Вт} . \end{aligned} \quad (3.38)$$

Коефіцієнт потужності на цій швидкості визначається шляхом ділення перетвореної потужності на потужність потоку повітря:

$$\begin{aligned} C_P &= \frac{P_T}{P_0} \\ C_P &= 0,262 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Коефіцієнт завад для досліджуваних умов експлуатації визначається за допомогою:

$$\begin{aligned} C_P &= 4a (1 - a)^2 \\ a &= 0,08 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Максимальний коефіцієнт потужності досягається, коли коефіцієнт завад дорівнює 0,5.

В умовах тестування в конкретний день випробувань турбіна працювала при швидкості вітру 6 м/с і досягла коефіцієнта потужності 0,262. Вироблена потужність склала 167 Вт, що недостатньо для роботи генератора на повну потужність, однак очікується, що коли швидкість вітру досягне 9 м/с , генератор буде виробляти свою максимальну потенційну енергію.

3.7 Узагальнення результатів роботи

Малі системи перетворення енергії вітру є ефективним, екологічно чистим джерелом енергії для домогосподарств та інших потреб. Хоча вони залежать від кліматичних умов і не завжди забезпечують постійне постачання

енергії, їх можна адаптувати до накопичувачів енергії, які дозволяють вибірково розподіляти енергію після її перетворення.

Всі сучасні вітрогенератори використовують підйомну силу для створення обертального руху, який приводить в дію редуктор і генератор. Для виробництва електроенергії високі швидкості обертання ротора є сприятливими, оскільки вони зменшують передавальне число редуктора, необхідне для досягнення оптимальної робочої швидкості генератора. Ротори з низькою масивністю забезпечують високу швидкість обертання, однак ротор також повинен створювати достатній крутний момент для подолання втрат у трансмісії та генераторі. Трилопатеві турбіни мають найбільш підходящу масивність для широкого діапазону швидкостей вітру і найчастіше використовуються як механічні/електричні перетворювачі.

Автори [19] стверджують, що на хорошій ділянці вітрова турбіна «відновлює» енергію, використану при її виготовленні та встановленні, протягом першого року експлуатації. Хоча це не завжди так, це підкреслює потенціал вітроенергетичних перетворювачів як джерела сталого енергопостачання в майбутньому.

Результатом розробки в даній роботі є невелика вітрова турбіна потужністю 0,5 - 2 кВт, що виробляє електричну енергію. Її конструкція базується на 3-лопатевій вітровій турбіні з горизонтальною віссю, призначеній для зарядки акумуляторних батарей у віддалених або ізольованих населених пунктах і житлових будинках. Турбіна використовує синхронний генератор для виробництва змінного струму, який потім інвертується в постійний і регулюється регулятором.

Ротор (рис. 3.9) має відносно високий коефіцієнт крутного моменту і був спроектований з використанням вигнутого аеродинамічного профілю, що дозволяє йому виробляти електроенергію навіть при низьких швидкостях вітру. За низької швидкості вітру вироблена електроенергія використовується для поступового заряджання акумуляторної батареї – основного накопичувача енергії системи. Коли акумуляторна батарея повністю заряджена, регулятор

перенаправляє живлення на скидне навантаження, наприклад, на водонагрівач, щоб енергія не витрачалася даремно.

Механічна конструкція включає в себе:

- трилопатева система ротора з вигнутим аеродинамічним профілем;
- коробка передач зі швидкістю 1:6 (рис. 3.10);
- відцентрове гальмо, що регулює швидкість;
- генератор змінного струму потужністю 500-2000 Вт (залежно від області застосування, швидкості вітру тощо);
- алюмінієва рама;
- кришка мотогондоли зі скловолокна з повітрозабірниками для конвективного охолодження генератора і відцентрового блоку розбиття;
- канал, що дозволяє ротору підлаштовуватися під напрямок зустрічного вітру (рисання);
- сталева вежа (перевага надається волокнистим композитам);
- залізобетонний фундамент (пробурена шахта, розтрубне дно).

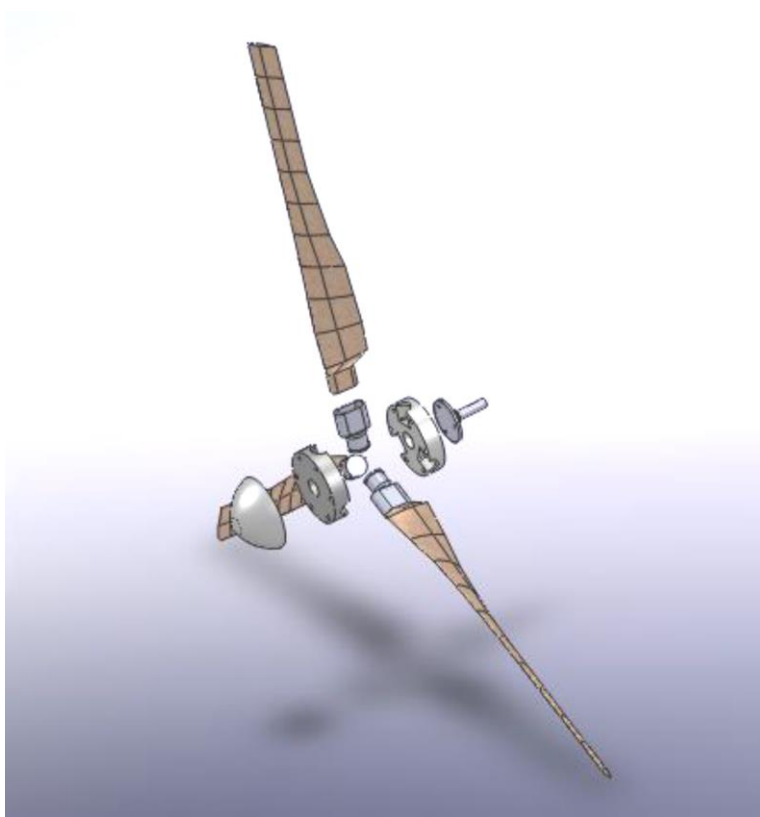


Рисунок 3.9 - Ротор і хаб в зборі

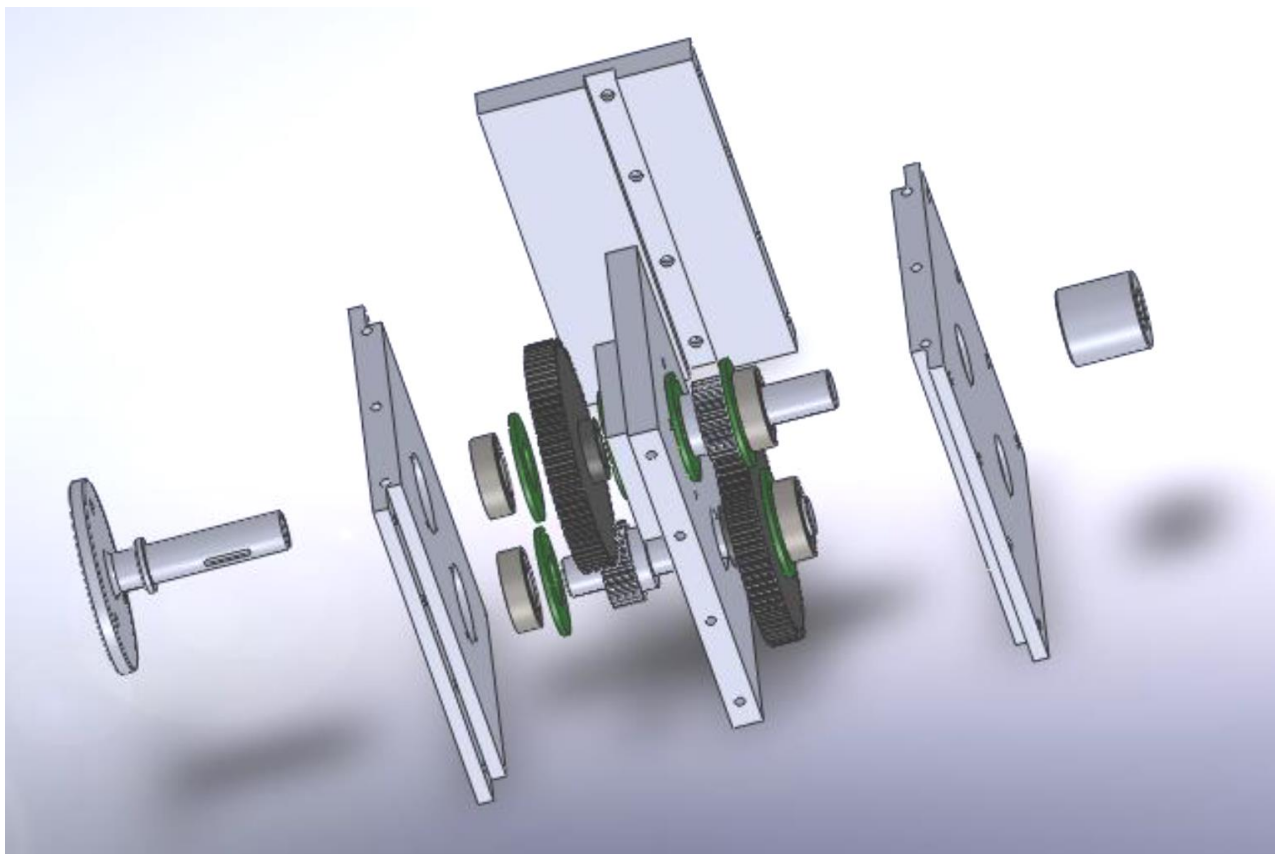


Рисунок 3.10 – «Розбитий» редуктор в зборі

Різні компоненти турбінної установки (рис.3.11) були розроблені з матеріалів, які легко піддаються переробці після закінчення терміну служби турбіни. Корпус редуктора і каркас мотогондоли виготовлені з суцільнокатаного листового алюмінію через його високу пластичність, а також тому, що алюміній легко плавиться і відливається повторно.

Завдяки співвідношенню міцності до ваги, а також тому, що алюміній легко плавиться і відливається повторно. Шестерні виготовлені із загартованої сталі 4140, легованої сталі з високою міцністю на розрив, яку можна плавити та відливати повторно. Леза лопатей були розроблені для виготовлення з короткозернистої деревини з високою міцністю, яку можна різати, обробляти та шліфувати до досягнення бажаної форми леза. Використання деревини, а не скловолокна, знижує вартість лопатей, а також збільшує можливість вторинної переробки системи. Однак на зовнішню поверхню лопатей наноситься шар смоли для захисту деревини від води.

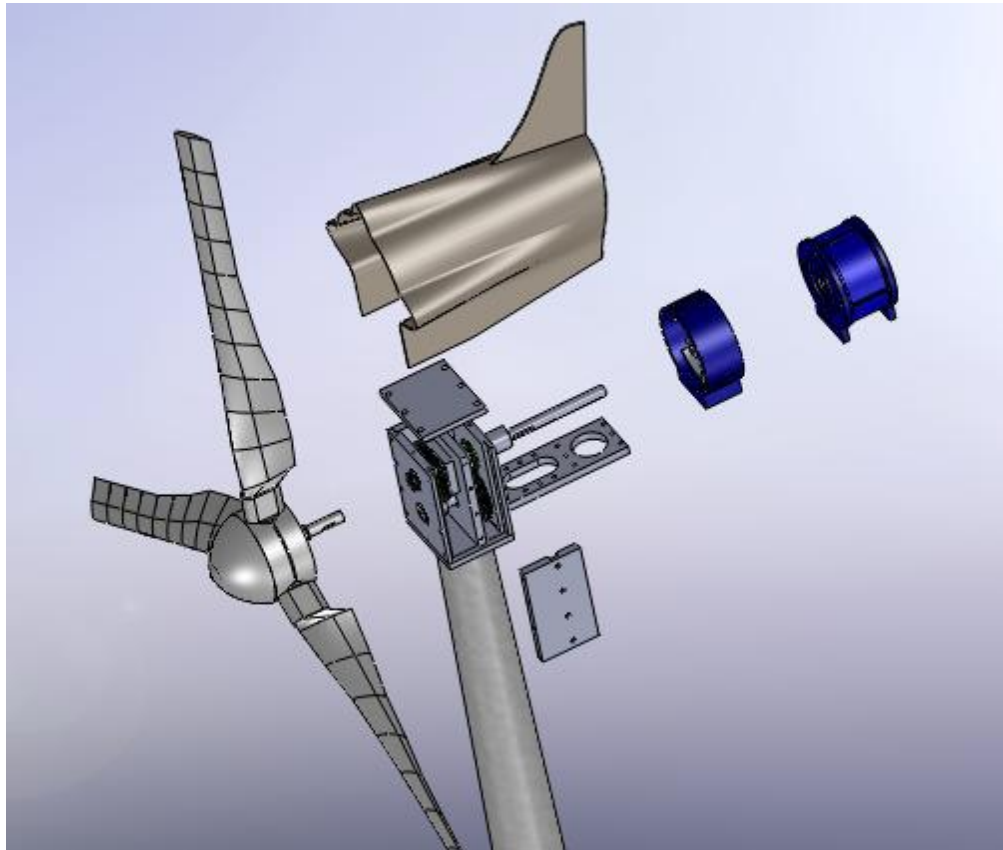


Рисунок 3.11 – «Розбита» гондола в зборі з ротором

Лопаті з хабом встановлені безпосередньо на вхідному валу редуктора. Вхідний вал редуктора підтримується в радіальному напрямку двома радіальними роликовими підшипниками, а в осьовому - упорним підшипником, який знаходиться між корпусом редуктора і буртиком на вхідному валу. У редукторі використовуються закриті роликові підшипники, закріплені нейлоновими утримуючими пластинами для ущільнення редуктора і обмеження осьового положення шестерень. Шестерні закріплені на валах за допомогою 6-міліметрових шпонок і гвинтів. Швидкість вихідного валу генератора регулюється відцентровим фрикційним гальмом, встановленим на валу перед генератором. Обмежувач швидкості обмежує максимальну швидкість обертання до 1000 об/хв, що запобігає перевищенню швидкості турбіни і пошкодженню будь-яких внутрішніх компонентів або зовнішніх корпусів. Рамна конструкція гондоли, яка слугує монтажною платформою для гальма і генератора, встановлена безпосередньо на корпусі редуктора. Платформа була

спроектована таким чином, щоб кабелі електропередачі проходили від генератора до центру вежі, де вони перенаправляються до інвертора і регулятора.

Гондола турбіни встановлена на поворотному центрі на верхівці вежі. Поворотний центр складається з втулки з внутрішнім упорним підшипником, який дозволяє ротору і гондолі підлаштовуватися під напрямок зустрічного вітру.

5-метрова вежа піднімає турбіну на відповідну висоту над об'єктами, що заважають, такими як будинки і невеликі дерева, що дозволяє використовувати її в домашніх умовах. Однак вежа слугує лише основою для турбіни, і її можна легко встановити на існуючі платформи, такі як вежі механічних вітряків, дахи будинків, резервуари для води та інші придатні для цього платформи.

Турбіна спроектована для роботи на піковій швидкості обертання при швидкості вітру 9-10 м/с. Однак в реальності швидкість вітру повинна бути дещо вищою, щоб врахувати втрати в трансмісії та генераторі, а також недосконалість конструкції ротора і втрати на лопатях.

3.8 Висновки до розділу

1. Наведено методику розрахунку енергетичних показників вітрогенератора.
2. Проведено аналіз роботи лопатей та розглянуто вплив їх геометрії на ефективність перетворення енергії.
3. Проведено розрахунок навантаження на кожну лопать.
4. Визначено продуктивності горизонтально-осьової турбіни вітрогенератора.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [24]:

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

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

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

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

засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

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

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

4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання

Для попередження про небезпеку застосовують звукові, світлові і кольорові сигнали. Сигнальні пристрої встановлюються в зонах видимості і слухового відчуття обслуговуючого персоналу. Сигнали небезпеки повинні чітко сприйматися у виробничій обстановці [24].

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

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

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

Сигнально-попереджувальним фарбуванням (жовтими і чорними смугами) відмічаються елементи будівельних конструкцій і міжцехового транспорту. Так, жовто-чорною смугою позначаються низькі балки, виступи і перепади у площині підлоги, краю люків і колодязів, кабіни і перила кранів,

вантажні гаки, бічні поверхні електрокарів, навантажувачів, візків, стріл автокранів.

Огородження небезпечних зон із зовнішнього боку фарбують в жовтий колір, із внутрішнього - в червоний.

Габарити проїздів, проходи і робочі місця на підлозі виробничих приміщень позначаються смугою чи штриховими лініями білого чи жовтого кольору.

Розпізнавальне фарбування однойменних струмоведучих шин у кожній електроустановці приймається однаковим.

При змінному струмі фаза А фарбується в жовтий колір, фаза В - зелений, фаза С - червоний, нульова (при ізолюванні чи заземленій нейтралі) - в чорний; при однофазному струмі провідник, під'єднаний до початку обмотки джерела живлення, - в жовтий, до кінця обмотки - в червоний; при постійному струмі позитивна фаза "+" - в червоний, негативна "-" – в синій, нейтральна - в білий.

Стандартами передбачена система знаків безпеки, які повинні використовуватися не тільки в промисловості, але й в інших галузях народного господарства, а також передбачені знаки, які є загальними для багатьох виробництв і професій, але у разі необхідності вони можуть бути конкретизовані із використанням графічних зображень і надписів, що застосовуються в інших стандартах.

4.3 Заходи, які зменшують небезпеку виникнення вибухів та пожеж

Запобігання вибухів та пожеж – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення вибухів та пожеж.

Організаційні і технічні заходи щодо запобігання пожежі реалізуються ще на стадії проектування окремих об'єктів підприємств. При цьому заздалегідь вивчаються особливості технологічних процесів і об'єктів, можливі причини і джерела виникнення вибухів та пожеж. Запобігання пожежі великою мірою

сприяє правильне планування, розміщення основних об'єктів з урахуванням рельєфу місцевості, дотримання протипожежних розривів між будівлями відповідно до вимог генерального плану.

Попередження вибухів та пожеж на підприємствах досягається[24]:

- запобіганням утворенню горючого середовища;
- запобіганням виникненню в горючому середовищі або появи в ньому джерел запалювання.

Запобігання утворення горючого середовища повинно досягатися:

- максимально можливим застосуванням негорючих і важко горючих речовин і матеріалів;
- обмеженням маси і об'єму горючих речовин, матеріалів та найбільш безпечним способом їх розміщення;
- ізолюванням горючого середовища;
- підтримуванням концентрації горючих газів, пари, суспензій і окислювача в суміші за межею їх спалаху;
- достатньої концентрації флегматизатора в повітрі захищуваного об'єкту;
- підтримуванням його температури і тиску, за якими розповсюдження полум'я неможливе;
- максимальною механізацією і автоматизацією технологічних процесів, пов'язаних з вживанням горючих речовин;
- встановленням пожежонебезпечного обладнання, по можливості, в ізольованих приміщеннях чи на відкритих площадках;
- застосуванням для горючих речовин герметичного обладнання і тари;
- застосуванням пристроїв захисту виробничого обладнання з горючими речовинами від ушкоджень і аварій, встановленням відключаючих, відсікаючих та інших пристроїв;
- застосуванням ізольованих відсіків, камер, кабін.

Попередження утворення в горючому середовищі джерел запалювання повинно досягатися такими основними заходами [24]:

- застосуванням машин, механізмів, обладнання, пристроїв, під час експлуатації яких не утворюються джерела запалювання;
- застосуванням електрообладнання, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
- застосуванням в конструкції швидкодіючих засобів захисного відключення можливих джерел запалювання;
- застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки;
- пристроєм блискавкозахисту будівель, споруд і обладнання. Будівлі та споруди складів паливно-мастильних матеріалів захищають від прямих ударів блискавки, електростатичної та електромагнітної індукції та заносу потенціалів;
- підтримкою тиску в горючому середовищі нижчого за максимально припустимий за горючістю;
- зменшенням визначального розміру горючої суміші середовища нижче максимально припустимого за горючістю.;
- регламентацією виконання, застосування і режиму експлуатації машин, механізмів та іншого обладнання, матеріалів і виробів, що можуть бути джерелом запалювання горючого середовища;
- застосуванням енергоустаткування, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
- застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки.;
- регламентацією максимально допустимої температури нагрівання поверхонь обладнання і матеріалів, що можуть увійти в контакт з горючим середовищем. Режими роботи насосів, перекачувальних паливно-мастильних матеріалів не повинні спричиняти підвищене нагрівання їх поверхонь;

- регламентацією максимально допустимої енергії іскрового розряду в горючому середовищі. Знижувати енергію іскрового розряду можна, зменшуючи напруження між частинами обладнання, при якому відбувається іскровий розряд в горючому середовищі;
 - регламентацією максимально допустимої температури нагрівання горючих речовин, матеріалів і конструкцій;
 - застосуванням інструмента, що не іскрить під час роботи з легкозаймистими речовинами. Слід застосовувати інструмент і пристосування, що не висікають іскри під час ударів і падіння;
 - ліквідацією умов для хімічного самозагоряння речовин і матеріалів. До самозапалювальних речовин в технологічних процесах належать пірофорні речовини, що розігріваються при окисленні киснем повітря до 600 °C;
 - усуненням контакту з повітрям пірофорних речовин.
- .

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Описано основні типи вітрових турбін та наведено їх порівняльну характеристику.
2. Обґрунтовано використання у даній роботі трилопатевого вітроколеса.
3. Обґрунтовано конструкцію хабу, який призначений для кріплення лопатей до приводного валу.
4. Обґрунтовано загальну будову гондоли вітронегенератора.
5. Наведено опис коробки передач і відцентрованої системи гальмування.
Описано наступні елементи конструкції вітрогенератора: вали, підшипники, муфти, пружини, зчеплення та гальмівний механізм.
5. Описано конструкцію вежі турбіни, опор та фундаменту для її монтажу.
6. Проведено аналіз роботи лопатей та розглянуто вплив їх геометрії на ефективність перетворення енергії.
7. Проведено розрахунок навантаження на кожну лопать і визначено продуктивності горизонтально-осьової турбіни вітрогенератора.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Tsaglioti, F. Wind Power Automation Technology in Historical Perspective: From Pre-Industrial European Windmills to Inter-War Automatic American Wind Generators.
3. Christensen, B. (2013). History of Danish wind power. Wind power for the world: The rise of modern wind energy, 2, 33.
4. National Research Council, Division on Earth, Life Studies, Board on Environmental Studies, & Committee on Environmental Impacts of Wind-Energy Projects. (2007). Environmental impacts of wind-energy projects. National Academies Press.
5. Boyle, G. (Ed.). (2009). Renewable electricity and the grid: the challenge of variability. Routledge.
6. Teske, S., & Vincent, J. (2008). Energy [R] evolution: A sustainable Australia energy outlook.
7. Нау, Е., & Renouard, Н. (2006). Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics (Vol. 2). Berlin: springer.
8. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294
9. Білевич В.Р. Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни // В.Р. Білевич; А.М.Яковчук; В.П.Коваль / Фундаментальні та

прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 11-12

10. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 70.

11. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10

12. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204. — (Електротехніка та енергозбереження)

13. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.

14. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants / Myroslav Zin, Vadym Koval,

Mykola Tarasenko, Ivan Sysak // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24–31.

15. Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). Principles of foundation engineering. Cengage learning.

16. Randall, D. (2015). An introduction to the global circulation of the atmosphere. Princeton University Press.

17. Fox, R. W., MC DONALD, A. T., & Pritchard, P. J. (2004). Introduction to Fluid Mechanics 6th Edition. LTC,.

18. Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons.

19. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook. John Wiley & Sons.

20. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .

21. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

22. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)

23. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.

24. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. — 4-е видання. — К. : Каравела, 2008. — 384 с.

