

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

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ
ДВОХЛОПАТЕВОЇ ВІТРОВОЇ ТУРБИНИ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТмд-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Білевич В.Р

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Бабюк С.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(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 магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Білевичу Віталію Ростиславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Енергоефективність використання двохлопатевої вітрової турбіни

Керівник роботи к.т.н., доц. Бабюк С.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року № 4/7-965.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Вітрова турбіна є горизонтально-осьовою та має дві лопаті, Розташовані симетрично відносно осі.

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

1. Основи роботи вітрових турбін
 2. Вимоги до конструкції лопатей
 3. Вітрогенератори та основи аеродинамічної теорії
 4. Алгоритм розрахунку конструкції лопаті
 5. Проектування в Ashes і Excel
 6. Проектування в Autodesk Inventor
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
1. Дволопатева горизонтальна вітрова турбіна
 2. Поведінка повітряного потоку навколо лопаті
 3. Коефіцієнт потужності як функція
 4. Розклад сил підйомної та опору вздовж горизонтальної та вертикальної осей
 5. Алгоритм процедури проектування лопаті
 6. Алгоритм розрахунку лопаті
 7. Геометрія лопатей
 8. Отримані графічні характеристики
3. 3D модель проектного вітрової турбіни

[illegible]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

(підпис)

Білевич В.Р.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Бабюк С.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 83 сторінки, 15 аркушів презентації, 35 ілюстрацій, 4 таблиці та 17 використаних першоджерел.

Метою кваліфікаційної роботи є: розробка малої дволопатевої вітрової турбіни з горизонтальною віссю та розрахунок її характеристик.

Об'єкт дослідження – процес перетворення поступальної енергії вітру на обертовий рух валу вітрогенератора.

Предмет дослідження – вітрова турбіна вітрогенератора із двома симетрично розташованими лопатями.

У роботі обґрунтовано вимоги до конструкції лопатей вітрової турбіни та запропоновано алгоритм розрахунку конструкції лопаті, який реалізований у пакеті прикладних програм для чисельного аналізу Matlab. В результаті розрахунків отримано ключові характеристики вітрової турбіни, а саме крутний момент і тягове зусилля на кожній секції лопаті, кут скручування, вихідна потужність. Розроблено алгоритм процесу визначення найбільш ефективної геометрії лопаті. Створено 3D-модель вітрової турбіни.

Ключові слова: ВІТРОВА ТУРБІНА, ЛОПАТЬ, ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГІЯ ВІТРУ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Історична точка зору	10
1.2 Основи роботи вітрових турбін	12
1.2.1 Визначення вітрової турбіни	12
2.2.2 Типи вітрових турбін	12
1.3 Характеристики вітру та оцінка ресурсів	16
1.4 Нові технології та сучасні вітрогенератори	17
1.4.1 Морські вітрогенератори.....	17
1.4.2 Малі вітрові турбіни	19
1.5 Висновки до розділу	21
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	22
2.1 Вимоги до конструкції лопатей	22
2.2 Вітрогенератори та основи аеродинамічної теорії	22
2.2.1 Теорія аеродинамічного профілю.....	22
2.2.2 Параметри аеродинамічного профілю та лопаті.....	24
2.2.3 Скручування лопаті для підтримки постійного кута атаки.....	25
2.2.4 Вихідна енергія та потужність.....	26
2.2.5 Характеристики конструкції вітрових турбін	27
2.2.6 Закон Беца	31
2.2.7 Підхід з використанням диска-приводу	31
2.2.8 Осьовий індукційний коефіцієнт.....	33
2.2.9 Вираження потужності та коефіцієнта потужності відносно a	35
2.2.10 Демонстрація межі Беца	35
2.2.11 Вираження коефіцієнта тяги відносно a	37

2.2.12 Отримання максимального коефіцієнта тяги.....	37
2.2.13 Теорія обертового диска.....	38
2.2.14 Коефіцієнт індукції обертання.....	39
2.2.15 Модель сліду роторного диска	40
2.2.16 Теорія імпульсу лопаті	41
2.2.17 Метод імпульсу лопаті (МІЛ)	43
2.3 Висновки до розділу	44
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	46
3.1 Конструкція лопаті.....	46
3.1.1 Алгоритм розрахунку конструкції лопаті	46
3.1.2 Проектування в Matlab	46
3.1.2.1 Основні положення	46
3.1.2.2 Початкові розрахунки.....	47
3.1.2.3 Алгоритм.....	48
3.1.2.4 Результати розрахунків у Matlab	50
3.2 Проектування в Ashes і Excel.....	55
3.2.1 Основні положення	55
3.2.2 Введення даних в Ashes.....	57
3.2.3 Процес ітерації у Ashes і Excel	58
3.3 Проектування в Autodesk Inventor.....	63
3.3.1 Основні положення	63
3.3.2 Імпорт лопаті в Autodesk Inventor	64
3.3.3 Процес моделювання та результати.....	64
3.4 Висновки до розділу	67
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	69
4.1 Фізичні основи електробезпеки.....	69
4.2 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	70

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	76
ДОДАТКИ	79

ВСТУП

Актуальність теми.

З минулого століття людство намагається зменшити залежність від викопних палив, досліджуючи та вивчаючи інші джерела енергії. Ця зміна тенденції була зумовлена переважно економічними та, в меншій мірі, соціальними причинами. Особливо в 80-х роках суспільство почало турбуватися про новий термін, який сьогодні відомий як глобальне потепління. Глобальне потепління є найновішим типом кліматичних змін. Дійсно, наша планета страждає від кліматичних змін з самого початку свого існування. Однак наша соціальна та промислова еволюція, заснована на викидах CO₂ та викопному паливі, прискорює ці зміни.

Дійсно, таке швидке зростання викидів парникових газів є проблемою, оскільки воно змінює клімат швидше, ніж деякі живі організми можуть пристосуватися. Крім того, новий і більш непередбачуваний клімат ставить унікальні виклики для всього живого.

Через це відновлювані джерела енергії почали відчувати зростання ринку. Однак викопне паливо продовжувало домінувати на енергетичному ринку, і лише в цьому столітті відновлювані джерела енергії зазнали великого буму.

Цей бум був підсилений занепокоєнням суспільства та урядів екологічними проблемами. З початку цього століття глобальне потепління є загальновизнаною однією з найбільших проблем, з якими ми маємо зіткнутися в нашій сучасній історії.

Ця свідомість заради блага нашої планети змушує уряди, суспільство та більшість транснаціональних компаній інвестувати в енергетичну стійкість та відновлювані джерела енергії. Більше того, деякі уряди не тільки інвестують у ці нові джерела, але й карають викопне паливо та його похідні.

Усі ці причини спонукають наше суспільство та промисловість інвестувати більше в стабільність та відновлювані джерела енергії. Збільшення інвестицій призвело до розвитку нових технологій, досліджень, проектів та ідей. У цьому

сенсі найсильніші аргументи захисників викопного палива були послаблені завдяки збільшенню ефективності відновлюваних джерел енергії до неймовірних показників.

Більше того, ця еволюція на енергетичному ринку ставить під сумнів інші старі аргументи, роблячи вітрову енергію конкурентоспроможною за ціною з іншими джерелами енергії, такими як атомна та теплова енергія, які раніше вважалися найдешевшими джерелами.

Отже, наше суспільство та промисловість зараз еволюціонують у бік більшої екологічності. Вітроенергетика зараз є чудовою альтернативою для припинення масового використання викопного палива. Сьогодні вітроенергетична промисловість інвестує неймовірні суми грошей у дослідження нових проектів, таких як морські вітрові турбіни та малі вітрові електростанції.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: розробка малої дволопатевої вітрової турбіни з горизонтальною віссю та розрахунок її характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз вітроенергетики та основних типів вітрових турбін.
2. Обґрунтувати вимоги до конструкції лопатей вітрової турбіни.
3. Запропонувати алгоритм розрахунку конструкції лопаті.
4. Отримати такі характеристики вітрової турбіни, як крутний момент і тягове зусилля, кут скручування, вихідна потужність.
5. Створити 3D-модель вітрової турбіни.

Об'єкт дослідження – процес перетворення поступальної енергії вітру на обертовий рух валу вітрогенератора.

Предмет дослідження – вітрова турбіна вітрогенератора із двома симетрично розташованими лопатями.

Наукова новизна отриманих результатів. Дістала подальший розвиток теорія проектування лопатей та алгоритм розрахунку їх геометричних розмірів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримано ключові

характеристики вітрової турбіни, а саме крутний момент і тягове зусилля на кожній секції лопаті, кут скручування, вихідна потужність та інші. Створено 3D-модель вітрової турбіни за допомогою Autodesk Inventor Professional.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на міжнародній науково-практичній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 28-29 травня 2025 року [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (17 найменувань) та 2-х додатків.

Загальний обсяг текстової частини – 83 сторінки, 4 таблиці, 35 рисунків.

Робота оформлена відповідно до методичних рекомендацій [2].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Історична точка зору

Протягом трьох тисяч років люди використовували вітер у своєму повсякденному житті. Починаючи з вітрильних суден, енергія вітру була розширена на ранні вітряки для помелу зерна. Вітряки відомі як одна з найдавніших машин в історії. Вважається, що вони з'явилися в Персії в VII столітті. До XII століття їх використання поширилося по всій Європі.

Однак у промисловості домінували і досі домінують викопні види палива та видобуток нафти. Проте ця тенденція почала змінюватися протягом останніх чотирьох десятиліть. У цьому сенсі наше суспільство, а особливо наша промисловість, еволюціонують у бік більшої екологічності [3-5].

Перші дослідження в галузі вітроенергетики проводив Чарльз Ф. Бруш (1849-1929), який створив першу вітротурбіну для виробництва електроенергії. Ця перша вітротурбіна складалася з ротора діаметром 17 м з 144 вовняними лопатями. Крім того, цей американський підприємець заснував у 1890 році компанію Brush Electric Company, яка у 1891 році об'єдналася з іншими компаніями, утворивши General Electric.

По-друге, коли йдеться про вітроенергетику, необхідно згадати німецького фізика Альберта Беца (1885-1968). На посаді директора аеродинамічного інституту в Геттінгені він сформулював закон Беца, який встановив максимальне значення, яке може бути використане для кінетичної енергії вітру, 59,3%. Його теорія щодо формування крил досі може бути використана для будівництва вітрових турбін.

З іншого боку, іншим піонером у цій галузі був датчанин Пол ла Кур (1846-1908), якого вважають батьком сучасної вітроенергетики. Він заснував першу академію вітроенергетики, з якої вийшли перші спеціалізовані інженери.

Виробництво його перших сучасних вітрових турбін припадає на 1930-1940-ті роки. Однак після Другої світової війни їх розвиток був зупинений

через низьку ціну на викопне паливо в ці роки. Лише після великої рецесії на ринку нафти в 1970-х роках їх дослідження було відновлено.

У ці роки рецесія на ринку нафти призвела до зміни тенденцій в енергетичній політиці. У цьому сенсі інтерес до альтернативних джерел енергії зріс і призвів до створення дослідницьких програм та грантів. З цього моменту вітроенергетика почала отримувати великі інвестиції.

Крім того, у 1980-х роках відбулися рухи проти ядерної енергії, які сприяли використанню відновлюваних джерел енергії. Протягом цього десятиліття та наступного відбулися великі досягнення у вітроенергетичних технологіях, які почали робити їх конкурентоспроможними порівняно з іншими невідновлюваними джерелами енергії. У 2001 році була заснована Всесвітня асоціація вітрової енергетики з штаб-квартирою в Бонні, Німеччина. З моменту свого створення метою цієї асоціації було просування цього джерела енергії. Протягом цього століття ринок вітрової енергетики зазнав значного зростання, особливо в області морських технологій.

"Цікаво відзначити, що глобальна потужність вітрової енергетики зараз все ще подвоюється кожні 3 роки. Найбільший регіональний внесок у це зростання встановленої потужності вітрової енергії зробила Китайська Народна Республіка. За даними GWEC, розвиток вітрової енергетики в Китаї за масштабами не має аналогів у світі. На кінець 2010 року встановлена потужність вітрової енергетики досягла 41,8 ГВт. До травня 2009 року 80 країн світу брали участь у виробництві вітрової енергії в комерційних масштабах. Прогнозувати зростання виробництва вітрової енергії далеко не просто. На кінець 2011 року загальна потужність вітрової енергетики у світі досягла 237 ГВт [6].

Ці зміни в енергетичній політиці та постійне зростання населення роблять вітрову енергетику однією з найбільш перспективних альтернатив на енергетичному ринку. У цьому сенсі очікується значне зростання ринку вітрової енергетики.

З огляду на це, великі міжнародні компанії, такі як Siemens, Gamesa, Vestas, Norges, Statoil та Enercon, серед інших, наразі розширюють свої морські проекти. Морські турбіни мають кращий доступ до вітру і можуть бути більшими за наземні турбіни. Ця зміна місця роботи дозволяє виробникам виготовляти вищі та більші турбіни, що призводить до збільшення виробництва енергії.

1.2 Основи роботи вітрових турбін

1.2.1 Визначення вітрової турбіни

Вітрова турбіна — це пристрій, який перетворює кінетичну енергію вітру в електричну. Цей пристрій складається в основному з ротора та генератора. Ротор (також відомий як турбіна) перетворює кінетичну енергію вітру в механічне обертання лопатей, а генератор перетворює цю механічну енергію турбіни в електричну. Цей термін не слід плутати з вітряком, який є машиною, що використовується для перетворення енергії вітру в механічну енергію [6].

Хоча за останні десятиліття було досягнуто значних успіхів в аеродинаміці та вітроенергетиці, ефективність вітрових турбін обмежується теоретичною межею, яка називається межею Беца [6]. Іншими словами, вітрові турбіни не здатні витягувати всю кінетичну енергію з вітру. Щоб вітротурбіна досягла 100% ефективності, вітер повинен бути повністю зупинений турбіною, що фізично неможливо. Це підтверджується теорією диска приводу та межею Беца.

2.2.2 Типи вітрових турбін

Вітротурбіни можна розділити на дві основні категорії: ті, що залежать від аеродинамічного приводу, і ті, що залежать від підйомної сили. [6]

Примітно, що турбіни, що приводяться в рух силою опору, мають набагато меншу ефективність. Це стосується старовинних вітряків, які, як наслідок, мали дуже низьку ефективність.

З іншого боку, сучасні турбіни зазвичай працюють за допомогою підйомної сили. Ротор цих машин призначений для взаємодії з повітряним потоком з метою створення підйомної сили. Однак вони все ще створюють невелику силу опору. У сучасних турбінах підйомна сила зазвичай у сто разів більша за силу опору.

Сучасні турбіни також можна розділити на горизонтальні вітрогенератори (ГВГ) (рис.1.1, 1.2) та вертикальні вітрогенератори (ВВГ) (рис.1.3, 1.4). ГВГ наразі найчастіше використовуються у виробництві енергії. Однак ВВГ мають певні переваги у турбулентному повітряному потоці та при слабкому вітрі. Крім того, вони безшумні та можуть працювати при вітрах, що постійно змінюють напрямок. Проте, ця кваліфікаційна робота зосереджена на ГВГ, тому продуктивність ВВГ виходить за рамки цієї статті.



Рисунок 1.1 – Дволопатева HAWT (Dreamstime)



Рисунок 1.2 – Трилопатева НАWT (Gamesa)



Рисунок 1.3 – Вітрогенератор вертикального типу



Рисунок 1.4 – Вітрогенератор вертикального типу в Данії (WePower)

Великі ГВГ

Як було зазначено вище, ГВГ домінують у всіх сферах застосування енергетичного ринку. Найпоширенішою вітровою турбіною є трилопатева горизонтальна вітрова турбіна, показана на рис.1.1. Ці турбіни в основному складаються з гондоли, встановленої на вершині високої вежі, що містить генератор і, як правило, редуктор, до якого прикріплений ротор [6].

Іншою ключовою відмінністю вітрових турбін є кількість лопатей, яка в основному залежить від призначення турбіни. Наприклад, трилопатеві турбіни зазвичай використовуються для масового виробництва електроенергії, а дволопатеві турбіни — для невеликих вітрових установок.

Дволопатеві турбіни, як правило, мають вищий коефіцієнт швидкості кінців лопатей і менший пусковий крутний момент. Це логічно, оскільки їх інерція нижча, ніж у трилопатевих вітрових турбін. Однак дволопатеві вітрові турбіни зазвичай потребують деякої допомоги при запуску, щоб досягти робочої точки.

З іншого боку, найважливішим параметром при виробництві електроенергії є діаметр ротора. Чим більші лопаті, тим більша площа охоплення і тим більша потужність, яку вони виробляють. У цьому сенсі нові конструкції ГВГ, як правило, більші і вищі. Примітно, що чим вище розташований ротор, тим кращі вітрові ресурси.

Малі ГВГ

Ці турбіни були розроблені в XIX столітті для сільськогосподарських завдань, таких як перекачування води. Однак у всьому світі спостерігається відродження малих ГВГ для забезпечення електроенергією віддалених будинків [6]. Крім того, їх можна використовувати в аеропортах та інших місцях, де великі ГВГ не можуть працювати на законних підставах. Малі ГВГ також є чудовим інструментом для видобутку енергії з бідних вітрових ресурсів. Ця тенденція до використання малих вітрових турбін розвивалася на початку 1970-х років, але зараз вона переживає відродження завдяки новій політиці на енергетичному ринку. Нові малі ГВГ мають потужність від 1 до 100 кВт і є ідеальним варіантом для міст і віддалених місць.

Транснаціональні корпорації починають вкладати великі кошти в пошук компромісу між викопним паливом та відновлюваними джерелами енергії, де малі горизонтальні вітрогенератори можуть ідеально відповідати їхнім інтересам.

1.3 Характеристики вітру та оцінка ресурсів

Вітроенергетика відома своєю мінливістю як у просторі, так і в часі. Ця мінливість залежить від багатьох факторів, таких як: пора року, тип рослинності в місцевості, кліматичний регіон, але особливо від висоти над рівнем моря та рельєфу. У цьому сенсі вітер сильніший у горах або на узбережжі, ніж у долинах [6].

З цієї причини нові конструкції сучасних вітрових турбін, як правило, розміщуються на морському узбережжі, де вітрові ресурси кращі. Крім того,

законодавство щодо розмірів на морському узбережжі є менш суворим, тому ми можемо виробляти більші турбіни та покращувати виробництво електроенергії. Більше того, морський вітер характеризується більшою силою та меншою турбулентністю, ніж вітер у внутрішніх районах.

Основною причиною того, що морські райони мають кращі вітрові ресурси, є різниця в нагріванні між сушею і морем. З огляду на все це, перед встановленням вітрових турбін необхідний глибокий аналіз вітрових ресурсів. Оцінка вітрових ресурсів супроводжується статистикою.

Отже, для оцінки частоти швидкості вітру в певному місці часто потрібний розподіл ймовірностей. Два найпоширеніші розподіли:

- Розподіл Релея
- Розподіл Вейбулла

Хоча розподіл Релея є простішим за розподіл Вейбулла, останній є точнішим і ширше використовується в промислових застосуваннях. Однак вітер може змінюватися з року в рік. Ці зміни недостатньо вивчені, і статистика є єдиним інструментом, який ми маємо для аналізу вітрових ресурсів.

Вітер повинен бути сильним протягом достатнього часу, щоб бути рентабельним. Отже, вітроенергетичні ресурси є основним параметром при прийнятті рішення про місце розташування вітрової електростанції та про те, який тип турбіни найкраще відповідає місцевим ресурсам.

1.4 Нові технології та сучасні вітрогенератори

1.4.1 Морські вітрогенератори

Як зазначалося вище, вітроенергетика зазнала значного розвитку протягом останніх десятиліть. Хоча були досягнуті значні поліпшення в аеродинаміці вітрогенераторів, найбільший прогрес пов'язаний з морською технологією.

З початку цього століття великі виробники вітрових турбін інвестують і досліджують морські проекти. Хоча вихід у море не є новою ідеєю (деякі

пілотні проекти були реалізовані в 1990-х роках), вони стали популярними лише в XX столітті.

Вихід у море має як переваги, так і недоліки. З одного боку, вітрові турбіни мають кращі характеристики і краще джерело вітру, але з іншого боку, їх установка і обслуговування є більш складними. Слід зазначити, що сильні шторми та хвилі в відкритому океані можуть бути дуже потужними і легко пошкодити турбіну. Крім того, морські турбіни можуть зазнавати більших втрат, оскільки вони зазвичай розташовані далі від точки підключення, ніж наземні вітрогенератори.

Однак значні переваги в області управління сприяли перенесенню вітрогенераторів у море з метою підвищення потужності виробництва електроенергії. Іншою поширеною тенденцією останніх років є проектування більших і вищих вітрогенераторів. Це має сенс, оскільки, з одного боку, чим більша вітротурбіна, тим більша потужність, а з іншого боку, чим вище вона розташована, тим кращий вітровий ресурс.

Однією з головних проблем морської технології є необхідність віддалятися від берега, де менше перешкод і можна досягти кращої продуктивності. Однак віддалятися далі складно, оскільки це означає заглиблюватися.

Тому більшість провідних виробників вітрових турбін працюють над вирішенням цієї проблеми. Однак саме компанія Statoil запропонувала одне з найінноваційніших рішень в історії вітрових турбін, встановивши плавучі вітрові електростанції. Цей проект під назвою Hywind був розроблений норвезькою компанією в Букан-Діп, за 25 км від берега Пітерхеда, з метою використання вітрових ресурсів Шотландії (рис.1.5).

Ця пілотна вітроелектростанція вважається важливим кроком вперед у технології морських вітрових турбін. Таким чином, всі ці зміни революціонізували вітроенергетичну галузь до такої міри, що вона стала конкурентоспроможною з невідновлюваними джерелами енергії.

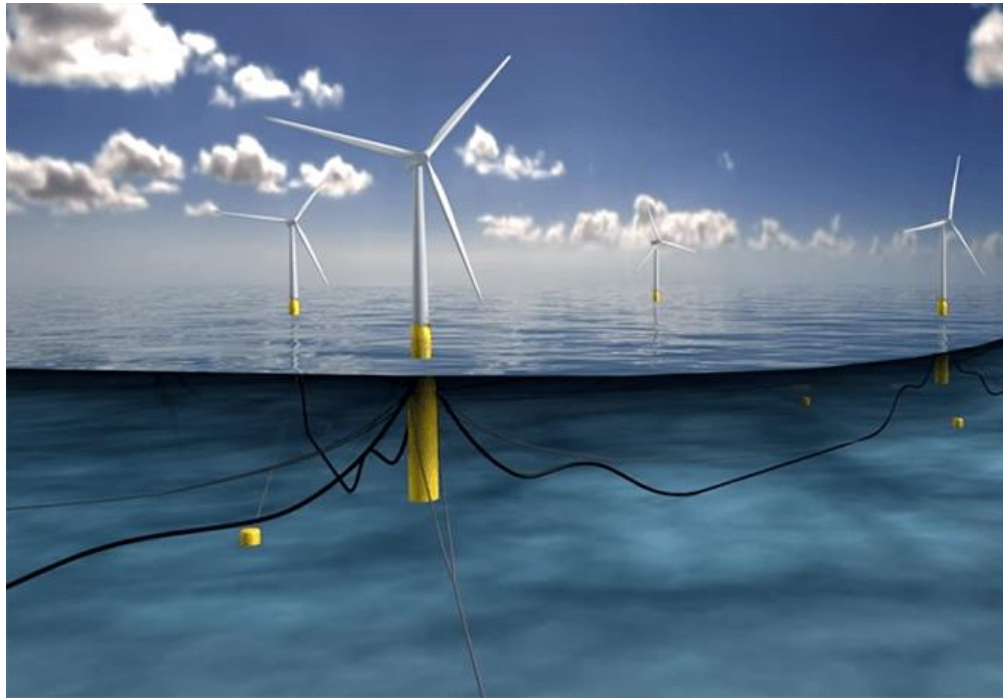


Рисунок 1.5 – Модель плавучої електростанції Hywind

1.4.2 Малі вітрові турбіни

Іншою модною галуззю, пов'язаною з вітровими турбінами, є так звані «малі вітрові турбіни». Малі вітрові турбіни — це невеликі вітрові турбіни, які можуть виробляти електроенергію як в ізольованих місцях, так і в містах. Ці малі вітрові турбіни ідеально підходять для місць, де не можна встановити великі вітрові турбіни. Деякі з таких місць — аеропорти, міста, дороги та сімейні будинки.

В даний час, через зростаючу стурбованість глобальним потеплінням, багато сімей вирішують встановити власне джерело чистої енергії. Крім того, малі вітрові турбіни дають своїм клієнтам можливість заощаджувати гроші завдяки самоспоживанню.

Ці вітрові турбіни зазвичай мають висоту не більше 20-25 м і ротори діаметром 2-7 м (рис.1.6). Їхня потужність зазвичай становить від 1 кВт до 10 кВт. У цьому сенсі існує багато компаній, які спеціалізуються на малих вітрових турбінах, а не на великих.

Хоча ці невеликі вітрогенератори працюють з початку 1970-х років, вони зазвичай використовувалися для виробництва енергії поза мережею. Іншими словами, вони використовувалися для виробництва електроенергії для ізольованих місць, таких як ферми. Однак сьогодні вони використовуються для підвищення стійкості міст, будівель і заводів.

Крім того, вони кращі за великі вітрогенератори, коли мова йде про турбулентний потік. Завдяки цьому вони ідеально підходять для місць, де великі вітрогенератори не є оптимальним варіантом. Таким чином, використання малих вітрогенераторів у великих містах та аеропортах набуло широкого поширення. Зазначимо, що ця технологія доступна як для горизонтальної, так і для вертикальної осі.

Як висновок, можна вважати, що ця технологія конкурує з сонячною енергією у боротьбі за зменшення енергоспоживання великих компаній, будівель та сімейних будинків.



Рисунок 1.6 – Приклад горизонтальної дволопатевої малої вітрової турбіни FT-200012

1.5 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз історичного становлення вітроенергетики у світі. Встановлено актуальність її впровадження на сьогоднішній день.
2. Проаналізовано основні типи вітрових турбін.
3. Встановлено основні характеристики вітру та вітрових ресурсів, які враховуються при проектування вітротурбін.
4. Встановлено, що правильно спроектована конструкція лопаті забезпечує оптимальну швидкість обертання та крутний момент.
5. Наведено огляд нових технологій, які використовуються в сучасних вітрогенераторах.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вимоги до конструкції лопатей

У даному розділі представлено глибокий аналіз процедури проектування лопатей. Як було зазначено в цілях, метою цього проекту є проектування турбіни з загальною ефективністю 40% для таких початкових заданих характеристик:

- Максимальний діаметр ротора: 1 м
- Кількість лопатей: 2
- Аеродинамічний профіль: NRELS826
- Максимальний коефіцієнт швидкості кінчика лопаті (TSR): 7,5
- Мінімальна довжина хорди: 20 мм
- Розрахункова швидкість вітру: 10 м/с
- Мінімальна товщина лопаті: 0,6 мм

Однак перед тим, як перейти до процедури проектування, опишемо всі необхідні теоретичні основи для проектування вітрогенератора.

2.2 Вітрогенератори та основи аеродинамічної теорії

Теорія, яка наведена в цьому розділі базується на «Handbook of wind energy» [8], «Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery» [6] і «Wind turbine blade design» [9].

2.2.1 Теорія аеродинамічного профілю

Вітрові турбіни повинні створювати крутний момент для вироблення механічної енергії на валу, що, в свою чергу, є необхідним для вироблення електричної енергії. Цей крутний момент створюється аеродинамічними силами, що діють на лопать. Дві сили, що діють на лопать, — це підйомна сила

F_L та опірна сила F_D . Ці дві сили спричинені розподілом тиску навколо аеродинамічного профілю.

Профіль крила має таку форму, що повітряний потік розділяється над і під крилом. Між кожним розділенням існує різниця тиску і швидкості. Верхня поверхня зазнає більшої швидкості і, отже, має менший тиск, ніж нижня поверхня. Ця різниця тиску призводить до того, що крило зазнає підйомної сили, яка перпендикулярна до повітряного потоку [9].

У цьому сенсі підйомна сила змушує лопать рухатися перпендикулярно до потоку. Це сила, яку використовує ГВГ для обертання.

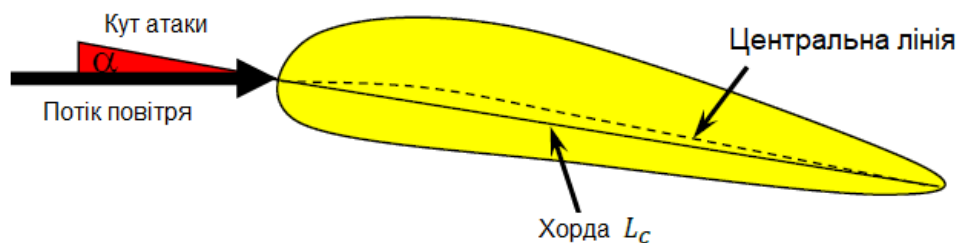


Рисунок 2.1 – Визначення хорди та кута атаки

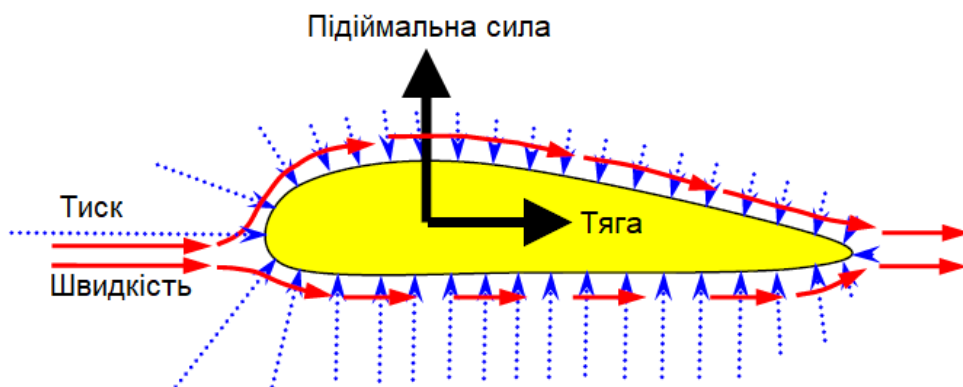


Рисунок 2.2 – Поведінка повітряного потоку навколо лопаті

Однак ця підйомна сила має «свою ціну», і на лопаті з'являється сила опору. Як можна побачити на рисунку 2.2, підйомна сила перпендикулярна до хорди, а сила опору паралельна до неї. Сила опору відображає опір лопаті осьовій силі, що створюється вітром.

З іншого боку, іншим важливим параметром, що контролює величину підйомної та опірної сил, є кут атаки. Цей кут визначається як кут між хордою та відносною швидкістю повітря [6].

Отже, ми можемо визначити підйомну та опірну сили як:

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_L L_C dr \\ F_D &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_D L_C dr \end{aligned} \quad (2.1)$$

де,

ρ – щільність повітря;

W – відносна швидкість повітря;

L_C – довжина хорди;

C_L – коефіцієнт підйомної сили;

C_D – коефіцієнт опору;

dr – диференціал довжини лопаті.

Коефіцієнти C_L та C_D також залежать від числа Рейнольдса для деяких значень кута атаки. Число Рейнольдса — це безрозмірне число, яке використовується для визначення переходу від ламінарного до турбулентного потоку. Це число можна визначити як:

$$\text{Re} = \frac{L_C W_2}{\mu} \quad (2.2)$$

де μ — кінематична в'язкість.

Однак ми можемо не брати до уваги вплив Рейнольдса при проектуванні лопатей, оскільки ця залежність спостерігається лише для деяких кутів атаки, які не входять до спектру проектування лопатей турбіни. Це дозволяє нам не брати до уваги вплив Рейнольдса при проектуванні турбіни без значних похибок.

2.2.2 Параметри аеродинамічного профілю та лопаті

Вітрові турбіни утворені аеродинамічними профілями, які дозволяють їм використовувати аеродинамічні сили для видобування енергії з вітру. Залежно від типу турбіни, вітрові турбіни використовують той чи інший профіль. Таким чином, аеродинамічні профілі ГВГ значно відрізняються від тих, що

використовуються ВВГ. У цьому сенсі ми зосередимося на теорії, що лежить в основі профілів ГВГ. Деякі ключові параметри лопаті та аеродинамічного профілю наведені нижче:

1. Хорда:

Хорда визначається як лінія, що з'єднує початок і кінець лопаті. Це також можна побачити на рисунку 2.3.

6. Довжина хорди:

Довжина хорди визначається як довжина аеродинамічного профілю від початку до кінця лопаті. Це можна легко зрозуміти з наступного малюнка:



Рисунок 2.3 – Відмінності між довжиною хорди та хордою

3. Кут скручування:

Кут скручування — це кут між хордою та площиною відліку, яка зазвичай є вертикальною площиною. На рисунку 2.3 це кут між зображеною хордою та площиною YZ.

4. Кут атаки

Кут атаки — це кут відносної швидкості вітру відносно лінії хорди. Під час цього проекту ми спроектували лопать так, щоб підтримувати цей кут атаки вздовж лопаті. Це можна зробити, скручуючи лопать.

2.2.3 Скручування лопаті для підтримки постійного кута атаки

Коефіцієнти C_L і C_D сильно залежать від кута атаки. Для проектування лопатей зазвичай використовують табличні дані, отримані в результаті випробувань в аеродинамічній трубі для певного профілю крила. З іншого боку, лопаті вітрогенераторів повинні бути спроектовані для оптимального кута

атаки вздовж лопаті. Цей оптимальний кут атаки визначається як кут, що забезпечує оптимальне співвідношення між коефіцієнтами підйомної сили та опору, і він є майже постійним по всій довжині лопаті.

Щоб підтримувати цей кут постійним, лопать потрібно скрутити. Це легко зрозуміти, проаналізувавши трикутники швидкості лопаті вздовж її поздовжньої осі. Хоча осьова швидкість вітру повинна бути постійною по всій довжині лопаті, слід зауважити, що чим далі ми віддаляємося від кореня лопаті, тим більша швидкість на кінці лопаті. Це збільшення швидкості на кінці лопаті призводить до збільшення відносної швидкості. Отже, як можна бачити на рисунку 2.4, єдиною можливістю зберегти оптимальний кут атаки по всій довжині лопаті є зміна положення кожної секції лопаті.

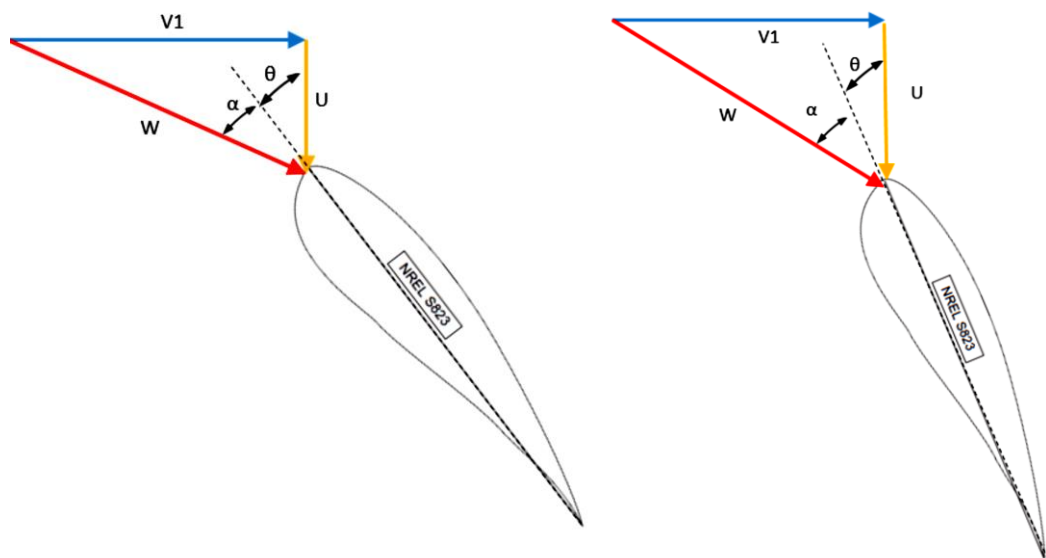


Рисунок 2.4 – Скручування лопаті для підтримки оптимального кута атаки вздовж лопаті

2.2.4 Вихідна енергія та потужність

Мета вітрової турбіни – витягти якомога більше кінетичної енергії з джерела вітру. Як буде пояснено пізніше, вітрові турбіни спричиняють зменшення швидкості та падіння тиску вітру через їх ротор, що призводить до обміну енергією між турбіною та вітром.

Слід зазначити, що цей обмін енергією є динамічним процесом, оскільки залежить від осрової швидкості вітру. Як було зазначено вище, джерело вітру постійно змінюється. У цьому сенсі загальна доступна кінетична енергія вітру при заданій швидкості (V_1) може бути виражена як:

$$E_{total} = \frac{1}{2} m V_1^2. \quad (2.3)$$

Де масова витрата визначається як:

$$m = (\rho V_1 A) t. \quad (2.4)$$

Як зазначено вище, швидкість вітру постійно змінюється, і тому, коли мова йде про вихідну енергію, цікавіше говорити про енергію за одиницю часу, яка також відома як потужність [кВт]. Отже, вихідна потужність є параметром, який змінюється з часом. Застосовуючи цю зміну, ми маємо:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{total} = P_{total} &= \frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 \\ P_{total} &= \frac{1}{2} \rho V_1^3 A \end{aligned} \quad (2.5)$$

Оскільки потужність залежить від часу, для обчислення загальної енергії, видобутої з вітру за певний період часу, необхідно підсумувати всі добутки потужності та часу за цей період. Таким чином, ми можемо виразити енергію в найпоширенішій одиниці виміру енергії, кВт·год. Цей добуток можна виразити як:

$$E_{total} = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt. \quad (2.6)$$

2.2.5 Характеристики конструкції вітрових турбін

Існують вітрові турбіни будь-якого типу та розміру. Отже, для врахування цієї мінливості застосовуються безрозмірні параметри. Ці безрозмірні параметри дають нам можливість порівнювати різні вітрові турбіни для широкого діапазону умов. Це допомагає нам, зокрема, порівнювати різні

турбіни для різних розмірів і джерел вітру. У цьому сенсі найважливішими безрозмірними параметрами в конструкції вітрових турбін є наступні:

Коефіцієнт кінцевої швидкості (TSR):

Коефіцієнт кінцевої швидкості, широко відомий як TSR, є одним з найважливіших безрозмірних параметрів для ГВГ. Цей параметр відноситься до співвідношення між кінцевою швидкістю і швидкістю вітру. Тому його можна визначити як:

$$\lambda = \frac{\Omega r}{C_{xl}}, \quad (2.7)$$

де

Ω – швидкість обертання ротора турбіни;

r – відстань до маточини;

C_{xl} – швидкість вітру далеко вгору за течією.

Іноді швидкість вітру далеко вгору за течією може називатися V_t .

Сила тяги — це сила тиску, що діє на турбіну в осьовому напрямку (напрямку вітру). Вітрові турбіни зазвичай зазнають впливу високих сил тяги, тому опір конструкції є ключовим фактором у проектуванні вітрових турбін. Наступний рисунок ілюструє важливість аналізу сили тяги, особливо в морських турбінах, де механізми контролю повинні протидіяти хвилям і океанським штормам. Наступний приклад показує, як згинальний момент, що створюється цією силою, спричиняє великі навантаження на фундамент.

У морських турбінах дуже важливо аналізувати цей параметр, оскільки якщо сильний шторм може вигнути турбіну, її вага може спричинити додатковий згинальний момент, який у більшості випадків призведе до руйнування. З цієї причини морські турбіни мають максимальний кут нахилу 3 градуси.

Однак аналіз вежі та фундаментів виходить за межі цієї роботи. Ця частина проекту фіксується за допомогою заданої конструкції, яка зазвичай використовується NTNU у власних експериментах. Загалом, чим вища ефективність, тим вища тягова сила.

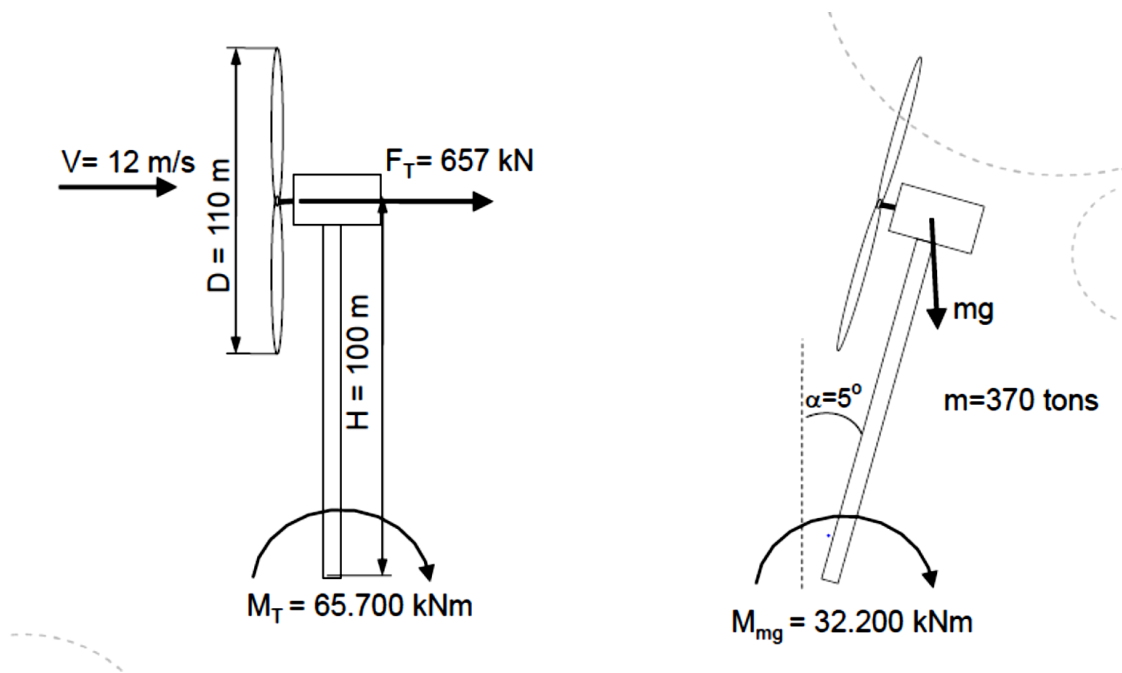


Рисунок 2.5 – Сила тяги та імпульс фундаменту

Ця тягова сила може бути записана як:

$$F_T = \frac{1}{2} \rho V^2 A_2 C_T \quad (2.8)$$

А коефіцієнт тяги визначається як:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V_1^2} \quad (2.9)$$

де, ρ – щільність повітря;

A – площа ротора;

T – момент крутного моменту.

Коефіцієнт підйомної сили

ГВГ використовують підйомну силу для вилучення енергії з вітру. Як видно з рівняння підйомної сили, воно працює як коефіцієнт зменшення при розрахунку загальної підйомної сили. Коефіцієнт підйомної сили пов'язує підйомну силу, що діє на лопать, з щільністю рідини навколо аеродинамічного профілю. Його можна виразити наступним чином:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A W^2} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт опору

Загалом, інженери намагаються максимально зменшити силу опору вітрових турбін. Однак ми можемо зменшити її лише до певної межі, оскільки, якщо ми хочемо максимізувати підйомну силу, ми отримаємо високий опір. Подібно до коефіцієнта підйомної сили, коефіцієнт опору діє як параметр зменшення при розрахунку загальної сили опору. Коефіцієнт опору можна визначити наступним чином:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A W^2} \quad (2.11)$$

Як і будь-який енергетичний обмін, вітрові турбіни не можуть повною мірою використовувати енергію вітру. Насправді, жодна з існуючих вітрових турбін не здатна видобувати більше 50% енергії вітру. Це контрастує з гідравлічними турбінами, які здатні досягати ефективності близько 95%.

Головною причиною такої низької ефективності є так званий ліміт Беца, який буде повністю пояснений далі в цьому розділі. Цей ліміт стверджує, що максимальна теоретична потужність, яка може бути видобута, ніколи не може перевищувати 59,3%. Отже, необхідно додати коефіцієнт зменшення потужності в рівняння вихідної потужності. Цей коефіцієнт потужності, відомий як C_p , виражається наступним чином:

$$C_p = \frac{\text{видобута потужність}}{\text{потужність вітру}} \quad (2.12)$$

Отже,

$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho V_1^3 A C_p \quad (2.13)$$

Де зверніть увагу, що цей C_p відноситься до аеродинамічних втрат, а не до механічних та електричних втрат. У цьому сенсі, для обчислення вихідної потужності необхідно враховувати як механічні втрати турбіни, так і втрати генератора. Добуток коефіцієнта потужності, механічних втрат турбіни та втрат генератора відомий як загальна ефективність.

2.2.6 Закон Беца

Цей закон був сформульований німецьким фізиком Альбертом Бецом у 1919 році. Закон Беца передбачає, що максимальний відсоток потужності, який можна отримати з вітру, становить 59,3 %.

Теорія, що лежить в основі цього закону, випливає з принципів збереження маси та імпульсу. Виробники зазвичай виражають аеродинамічну продуктивність турбіни як функцію межі Беца. Таким чином, звичайна турбіна зазвичай має аеродинамічну ефективність 70 % від межі Беца.

Щоб турбіна могла видобувати 100% енергії з вітру, вона повинна бути здатна зупинити вітер, що фізично неможливо. Ця ідея показана далі в підході з використанням диска-приводу.

2.2.7 Підхід з використанням диска-приводу

Існують деякі припущення, зроблені в цій теорії, які необхідно взяти до уваги:

1. Стабільний і рівномірний потік вище за течією від диска.
2. Рівномірна і стабільна швидкість на диску.
3. Відсутність обертання потоку, спричиненого диском.
4. Потік, що проходить через диск, утримується як вище, так і нижче за течією межевою трубкою.
5. Потік можна стиснути.

Ця теорія припускає, що турбіна складається з нескінченної кількості лопатей і тому може розглядатися як диск. Оскільки турбіна чинить опір потоку, швидкість повітря зменшується при наближенні до диска, і тому відбувається відповідне підвищення тиску. Потім рідина, що проходить через диск, зазнає падіння тиску, щоб в кінцевому підсумку поступово відновитися до тиску навколишнього середовища [6]. Цю зміну енергії можна побачити на наступному рисунку:

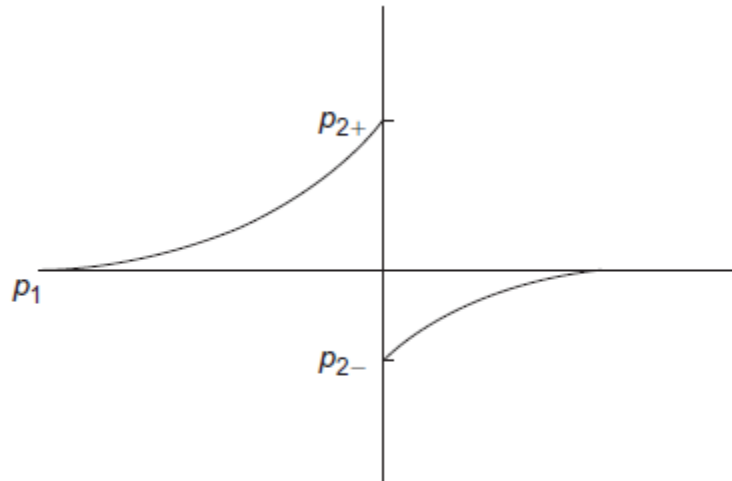


Рисунок 2.6 – Поведінка тиску через вітрову турбіну від далекого верхнього потоку до далекого нижнього потоку

Зниження швидкості відбуватиметься як перед, так і після вітрової турбіни. Отже, ця теорія аналізує потік повітря в трьох різних областях, як показано на рисунку 2.7. Перша область відноситься до швидкості вітру без перешкод, також відомої як швидкість вітру далеко вгору за течією. Друга секція відноситься до області ротора, яка поділяється на 2+ і 2- (відповідно перед турбіною і після турбіни). З іншого боку, третя область відома як далека нижня течія і відноситься до ділянки, де повітряний потік відновлює рівновагу [9]. Рисунок 2.7 ілюструє три різні області, проаналізовані за допомогою теорії диска приводу. Як видно з рисунка, швидкість вітру зменшується вздовж турбіни. Ця швидкість зміни швидкості вітру може бути проілюстрована за допомогою осьового індукційного коефіцієнта. Ця втрата енергії в рідині теоретично дорівнює енергії, поглинутій турбіною у вигляді механічної енергії обертання. Однак завжди існують тертя та механічні втрати, які віддаляють результати від ідеальних. Це є основною причиною, чому вітрові турбіни ніколи не можуть досягти потужності, що дорівнює оцінці за межею Беца, яка становить близько 59 %.

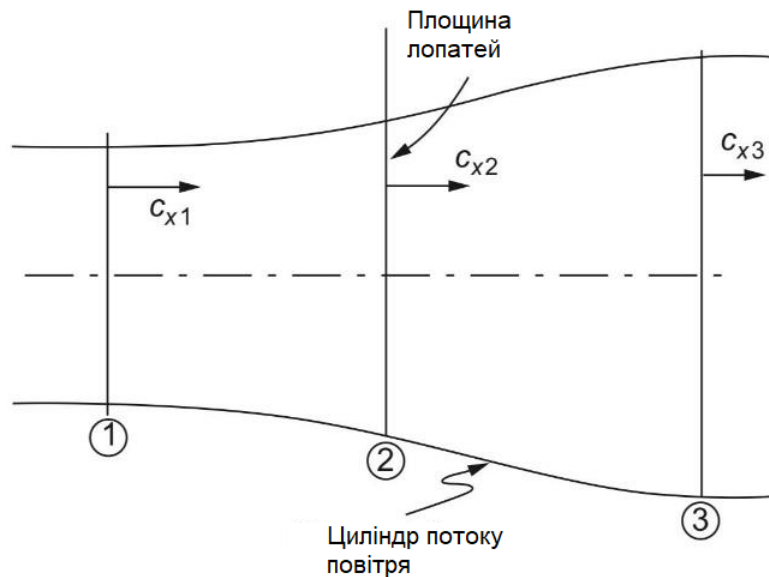


Рисунок 2.7 – Швидкість зміни швидкості вздовж турбіни [6]

2.2.8 Осьовий індукційний коефіцієнт

На початку єдиним ключовим параметром, який ми знаємо про повітряний потік, є швидкість вітру вище за течією. Тому осьовий індукційний коефіцієнт виникає з намагання виразити швидкість зміни вітру між трьома регіонами як функцію швидкості вітру далеко вище за течією. Таким чином, ми можемо розглядати цю швидкість зміни як індукцію від'ємної швидкості диском приводу ([9]. У цьому сенсі ми можемо розуміти коефіцієнт індукції як зображення втрати швидкості вітру, тому осьовий коефіцієнт індукції буде приймати значення від 0 до 1. Ця індукційна швидкість вітру показана на рис. 2.8.

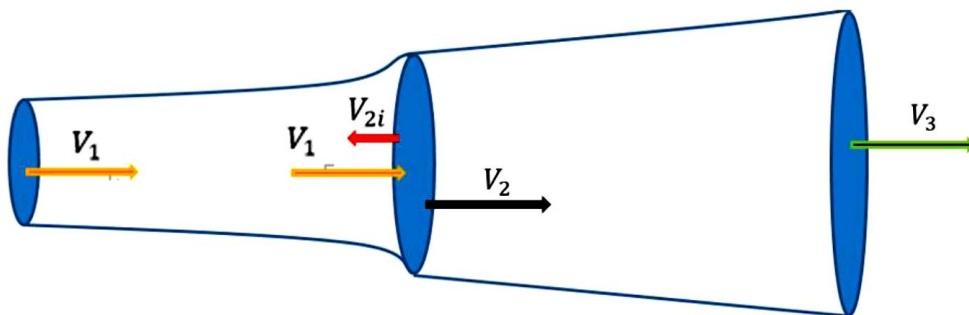


Рисунок 2.8 – Осьова індукційна швидкість на диску приводу

На рисунку 2.8 показано ідеальну модель осьового вітру через диск приводу. Ця теорія стверджує, що вітер, що виходить із трубки потоку, не

знає впливу турбіни. Навпаки, вітер усередині трубки потоку сповільнюється, і, як наслідок, $V_1 > V_2 > V_3$. Згідно з рівнянням неперервності $c_{x1} A_1 = c_{x2} A_2$, ми знаємо наступне:

$$A_1 < A_2 < A_3$$

Щоб оцінити осьовий індукційний коефіцієнт (a), ми можемо застосувати закон Бернуллі між областями 1 і 2- та областями 2+ і 3. Ми не можемо застосувати закон Бернуллі між 1 і 3, оскільки в турбіні відбувається обмін енергією, а отже, закон Бернуллі не діє між цими двома точками.

Для цього необхідно врахувати деякі припущення:

- Тиск в області 3 і області 1 однаковий $P_1 = P_3$.
- Швидкість вітру в області 2 постійна $V_{2-} = V_{2+}$

Отже, застосовуючи закон Бернуллі, отримуємо наступні співвідношення [9]:

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho V_{2-}^2 + p_2, \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_3^2 + p_3 = \frac{1}{2} \rho V_{2+}^2 + p_{2+}. \quad (2.15)$$

Отже,

$$\Delta p = p_{2+} - p_2 = \frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_1^2). \quad (2.16)$$

Враховуючи зміну швидкості імпульсу, отримуємо наступні рівняння:

$$(p_{2+} - p_{2-}) A_2 = (V_3 - V_1) (\rho V_2 A_2), \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_1^2) = (V_3 - V_1) (\rho V_2 A_2). \quad (2.18)$$

Отже,

$$V_3 = V_1 (1 - 2a). \quad (2.19)$$

Таким чином, ми можемо пов'язати всі швидкості вітру з далекою швидкістю течії, яка є єдиним відомим параметром. У цьому сенсі ми отримуємо наступні співвідношення:

$$\begin{cases} V_1 \\ V_2 = V_1(1-a) \\ V_3 = V_1(1-2a) \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2.9 Вираження потужності та коефіцієнта потужності відносно a

Вираження всіх швидкостей вітру як функції вітру далеко вгору за течією (єдиного відомого параметра вітру) дає нам можливість переформулювати рівняння X наступним чином:

$$\Delta p = p_{2+} - p_{2-} = 2\rho V_1^2 a(1-a) \quad (2.21)$$

З іншого боку, ми знаємо, що

$$\begin{aligned} P_{\text{видобута}} &= F_2 V_2 \\ P_{\text{видобута}} &= \Delta p A_2 V_2 \\ P_{\text{видобута}} &= (2\rho V_1^2 a(1-a)) A_2 V_1(1-a) \\ P_{\text{видобута}} &= 2\rho A_2 V_1^3 a(1-a)^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Отже, повертаючись до рівняння 2.6, ми можемо припустити, що коефіцієнт потужності дорівнює:

$$C_p = \frac{\text{видобута потужність}}{\text{потужність вітру}} = \frac{2\rho A_2 V_1^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A_2} \quad (2.21)$$

2.2.10 Демонстрація межі Беца

Відношення вихідної потужності та аеродинамічної ефективності до осьового індукційного коефіцієнта дає нам простий спосіб продемонструвати межу Беца. Таким чином, ми можемо зробити це двома способами:

Аналітичний метод:

Ми можемо продемонструвати закон Беца, просто диференціювавши коефіцієнт потужності за осьовим коефіцієнтом і шукаючи його максимальне значення.

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{d(4a(1-a)^2)}{da} = 0 \quad (2.22)$$

З цього рівняння отримуємо, що коефіцієнт потужності (C_p) досягає свого максимуму для $a = \frac{1}{3}$. Оцінюючи рівняння 2.21 з цим значенням a , ми отримуємо межу Беца:

$$C_p = 4 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = 0,593 = 59,3\% \quad (2.21)$$

Графічний метод:

Ми також можемо продемонструвати це, побудувавши графік коефіцієнта потужності (C_p) як функції осьового індукційного коефіцієнта (a). Таким чином, коефіцієнт потужності для ідеальної лопаті становить:

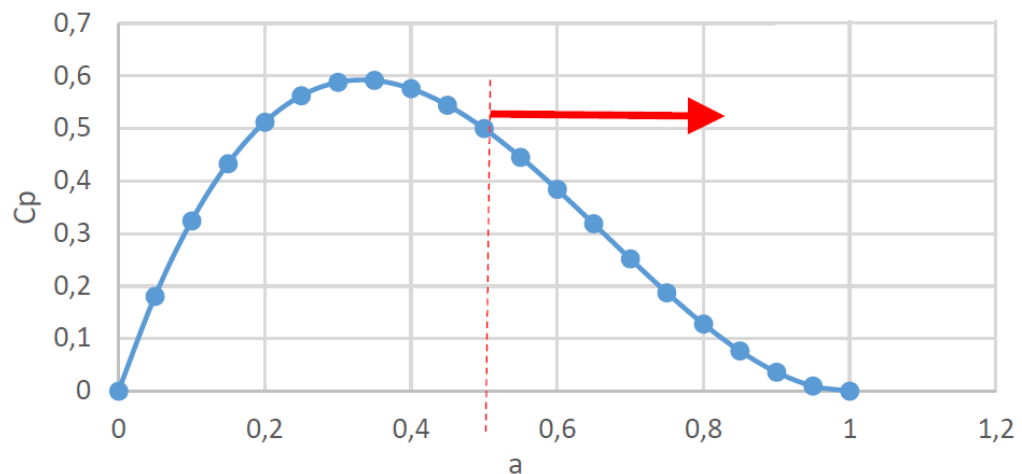


Рисунок 2.9 – Коефіцієнт потужності як функція осьового індукційного коефіцієнта

Зауважте, що хоча існує математичний сенс виражати коефіцієнт потужності для осьових індукційних коефіцієнтів між $[0,1]$, фізичного сенсу для значень, вищих за $a = 0,5$, немає, оскільки швидкість вітру V_2 буде від'ємною. Це також відбувається при аналізі коефіцієнта тяги як функції осьового індукційного коефіцієнта.

З іншого боку, загальний графік коефіцієнта потужності буде таким:

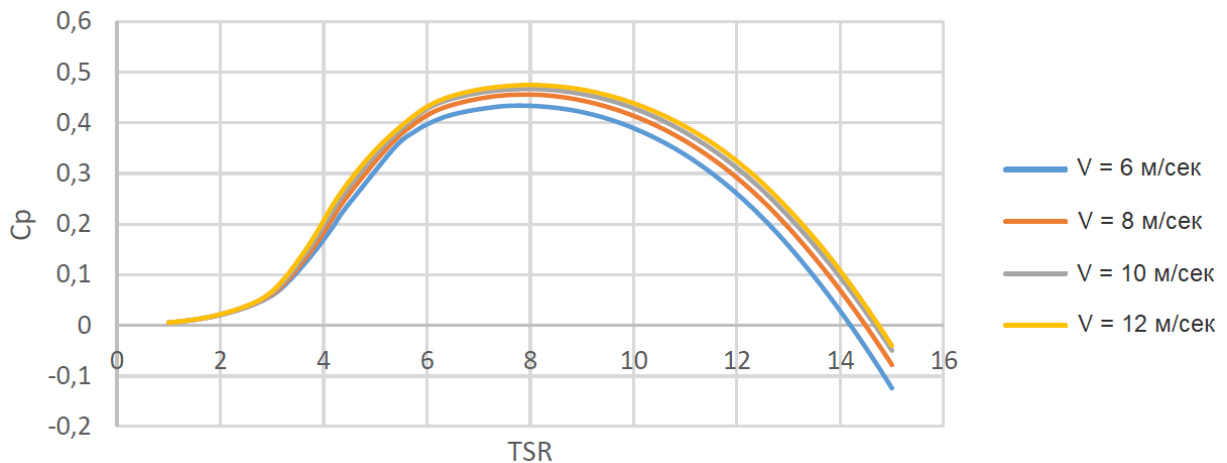


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт потужності в залежності від коефіцієнта швидкості кінчика (TSR) лопаті

На відміну від графіка на рисунку 2.9, цей графік пов'язує коефіцієнт потужності з TSR. Це досить типовий підхід при виборі оптимального TSR прототипу.

2.2.11 Вираження коефіцієнта тяги відносно a

Це можна зробити аналогічно до коефіцієнта потужності. Однак слід зазначити, що реальні турбіни зазнають сили тяги, яку не можна пояснити, використовуючи лише теорію імпульсу [9]. Таким чином, на відміну від коефіцієнта потужності, ми обмежимося показом того, як коефіцієнт тяги може бути виражений у функції a , і не будемо обговорювати процедуру отримання цього вираження.

У цьому сенсі коефіцієнт тяги стає:

$$C_T = \frac{\Delta p A_2}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_2} = 4a(1-a) \quad (2.22)$$

2.2.12 Отримання максимального коефіцієнта тяги

Подібно до демонстрації межі Беца, ми можемо обчислити максимальний коефіцієнт тяги графічним методом:

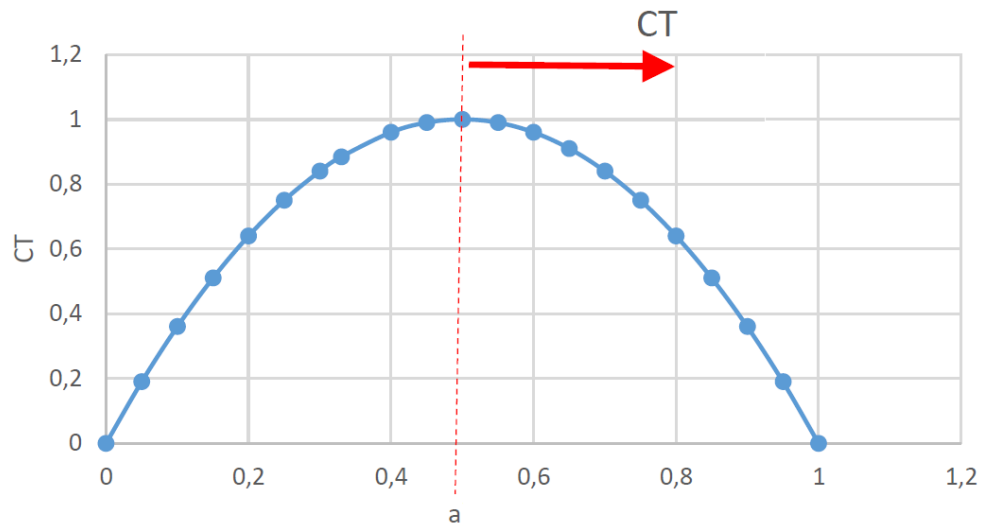


Рисунок 2.11 – Коефіцієнт тяги як функція осевого індукційного коефіцієнта

Як зазначалося раніше, фізично доцільно ілюструвати коефіцієнт тяги для значень, більших за $a > 0,5$, оскільки швидкість вітру після ротора буде від'ємною.

Отже, якщо проаналізувати коефіцієнт тяги для передбачуваного оптимального коефіцієнта потужності $a = \frac{1}{3} \rightarrow C_p = 0,593$, отримаємо такий коефіцієнт тяги:

$$C_T = 4a(1-a) = 4\frac{1}{3}\left(1-\frac{1}{3}\right) = \frac{8}{9} \quad (2.23)$$

2.2.13 Теорія обертового диска

Оскільки вітрові турбіни складаються не з дискових роторів, а з лопатевих роторів, потік також буде впливати на напрямок обертання. Таким чином, потік повітря зазнаватиме деяких змін у тангенціальному/обертовому напрямку на додаток до тих, що відбуваються в осевому напрямку. Вітер створює силу на лопаті, а лопать створює силу на вітер. Хоча швидкість повітряного потоку зменшується в осевому напрямку, вона збільшується в тангенціальному напрямку.

Відповідно до другого та третього законів Ньютона, ротор спричиняє прискорення повітряного потоку, що проходить через ротор, у напрямку, протилежному до результуючої сили лопаті. Це призводить до того, що повітряний потік зазнає індукованої швидкості обертання в напрямку, протилежному до обертання лопаті. Ця індукована швидкість таким же чином збільшує швидкість, яку відчують лопаті.

2.2.14 Коефіцієнт індукції обертання

Обертання лопатей індукує швидкість обертання в потоці повітря. Так само, як використовується коефіцієнт осьової індукції, коефіцієнт індукції обертання допомагає проаналізувати, як швидкість вітру змінюється через ротор у тангенціальному напрямку. Цей коефіцієнт зазвичай позначається як a' .

Хоча ця теорія припускає, що в повітряному потоці перед турбіною немає швидкості обертання, слід зазначити, що обертання лопатей індукує невелике обертання як вище, так і нижче за течією. Це індукційне обертання вище за течією пояснюється необхідністю перевірки рівняння неперервності та в'язкого тертя [9].

Ротор передає енергію повітряному потоку через обертальну індукцію, на відміну від осьових індукційних факторів, де енергія витягувалася з вітру. У цьому сенсі обертальний індукційний фактор спричиняє неминучу втрату енергії.

Однак цей обертальний індукційний фактор набагато менший за осьовий індукційний фактор. Короткий приклад того, що відбувається з повітряним потоком у турбіні, проілюстровано на трикутниках швидкості на рис.2.12.

Для спрощення розрахунків можна припустити, що кожна секція характеризується середнім трикутником швидкості. Це спрощення наближене до фізики і може бути зроблене без значної похибки. Цей метод показаний на рисунку 2.12.

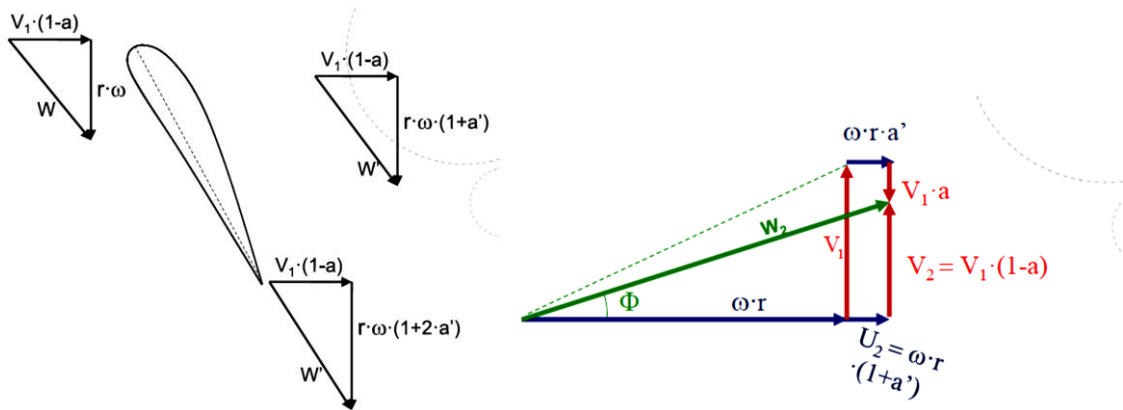


Рисунок 2.12 – Зміни швидкості вітру в турбіні. Трикутники швидкості

2.2.15 Модель сліду роторного диска

Модель сліду роторного диска є важливою для розуміння методу імпульсу лопаті (МІЛ), який буде детально пояснено під час проектування лопаті. Цей метод МІЛ був обраний для проектування лопаті через його простоту та точність. Модель сліду роторного диска — це модель, яка описує поведінку повітряного потоку через турбіну. Ця модель проілюстрована на наступному рисунку:

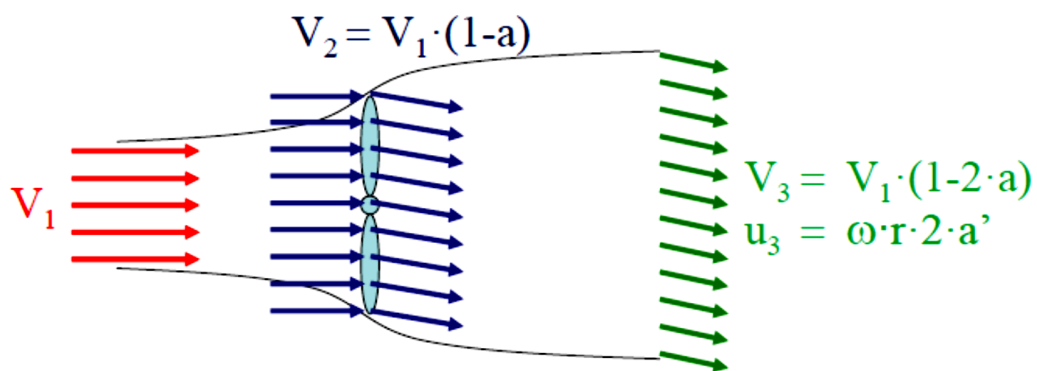


Рисунок 2.13 – Ілюстрація моделі сліду роторного диска

Для вирішення цієї моделі необхідно пов'язати швидкість вітру з аеродинамічними силами. Для цього нам потрібно звернутися до теорії аеродинамічних профілів, яка була вперше розглянута в цьому розділі.

Програма Matlab дає перший скелет лопаті, а програма Ashes використовувалася для перевірки розрахунків МІЛ. «Ці розрахунки відповідають оптимізаційному аналізу Глауерта, який розроблений і

використовується для визначення ідеальної форми лопаті для заданого коефіцієнта підйомної сили та для показу, як вибір коефіцієнта швидкості кінчика впливає на оптимальний коефіцієнт потужності ротора»[6].

2.2.16 Теорія імпульсу лопаті

Хоча теорія аеродинамічного профілю, представлена в цьому розділі, дійсна лише для крила нескінченної довжини, теорія імпульсу лопаті припускає, що теорія аеродинамічного профілю дійсна для крила обмеженої довжини dr , розділяючи нескінченну довжину на скінченну кількість елементів лопаті [9]. Це проілюстровано на рисунку 2.14.

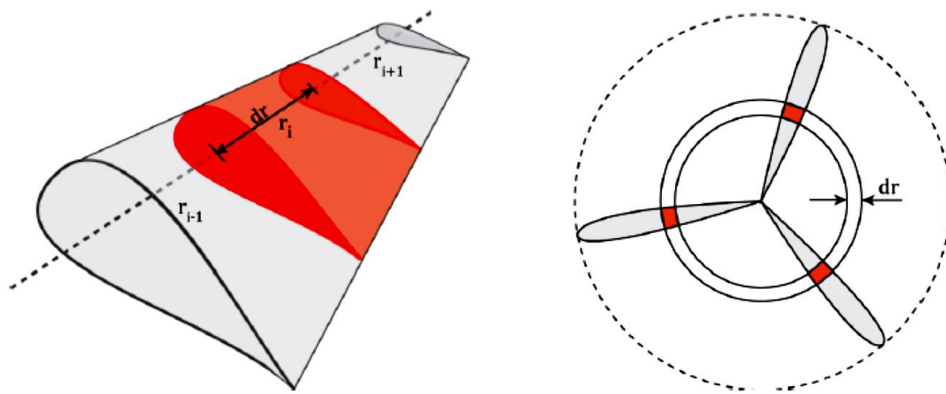


Рисунок 2.14 – Ілюстрація елементів лопаті турбіни

Метою цієї теорії є визначення крутного моменту M та тяги T . Для цього необхідно проаналізувати сили в осьовому та тангенціальному напрямках на кожному елементі лопаті. У цьому сенсі нам потрібно проаналізувати підйомну силу (F_L) та силу опору (F_D) вздовж кожного з елементів лопаті.

Загальноприйнятий спосіб полягає в тому, щоб підсумувати сили підйомної сили та опору для обчислення результуючої сили (F_R), а потім розкласти цю результуючу силу на осьовий та тангенціальний напрямки. Для цього ми використовуємо кут потоку, який є сумою кута скручування та кута атаки. Пам'ятайте, що кут потоку також визначається як кут між відносною швидкістю потоку та площиною, в якій обертається лопатка.

Отже, згадуючи рівняння підйомної сили та сили опору (формула 2.24), маємо:

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_L L_C dr \\ F_D &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_D L_C dr \end{aligned} \quad (2.24)$$

Потім, проектуючи суму цих двох сил в осьовому та тангенціальному напрямках, отримуємо:

$$\begin{aligned} T' &= F_L \cos \phi + F_D \sin \phi \\ M' &= F_L \sin \phi - F_D \cos \phi \end{aligned} \quad (2.25)$$

Цей розклад показано на наступному рисунку:

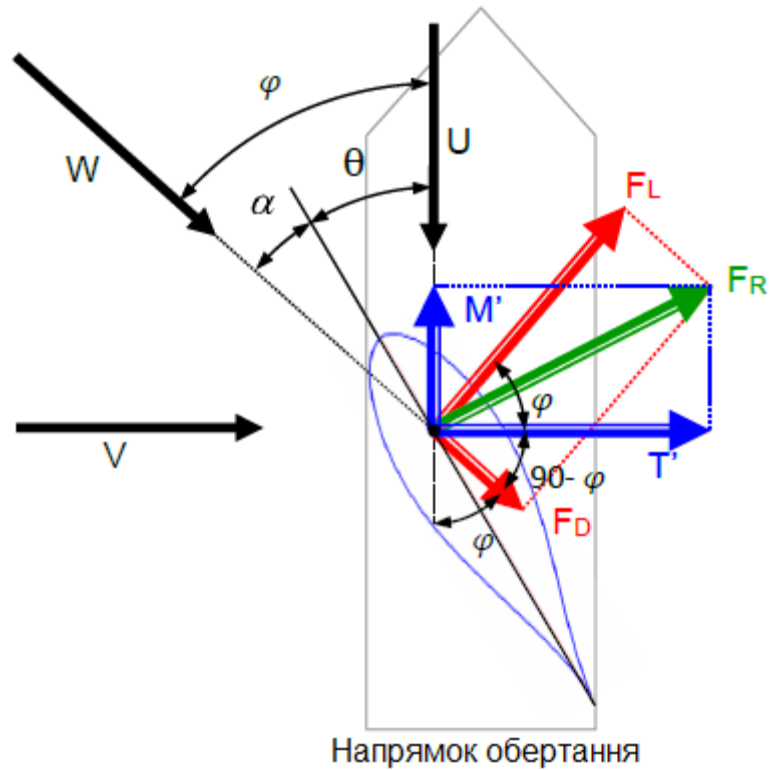


Рисунок 2.15 – Розклад сил підйомної та опору вздовж горизонтальної та вертикальної осей [10]

Щоб спростити теорію та уникнути розкладів, можна ввести два нових параметри: коефіцієнт осьової сили (C_a) та коефіцієнт обертальної сили (C_r). Ці два коефіцієнти можна позначити як:

$$\begin{aligned} C_a &= C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \\ C_r &= C_L \sin \phi + C_D \cos \phi \end{aligned} \quad (2.26)$$

Таким чином,

$$\begin{aligned}dT' &= C_a \frac{1}{2} \rho W^2 L_c dr \\dM' &= C_r \frac{1}{2} \rho W^2 L_c dr\end{aligned}\tag{2.27}$$

Зверніть увагу, що ця теорія застосовується до турбін з різною кількістю лопатей. Однак слід враховувати всі лопаті, беручи до уваги загальну кількість лопатей (Z). Отже, для обчислення загальних сил у кожній секції лопаті ми маємо помножити крутний момент і тягові сили на загальну кількість лопатей. Таким чином, маємо:

$$\begin{aligned}dT &= C_a \frac{1}{2} \rho W^2 L_c dr Z \\dM &= C_r \frac{1}{2} \rho W^2 L_c dr Z\end{aligned}\tag{2.28}$$

Зверніть увагу, що dT і dM — це сили однієї секції кільця товщиною dr (як показано на рис. 2.14 для трилопатевої вітротурбіни). З іншого боку, щоб отримати моментний внесок для кожної секції лопаті, ми повинні помножити dM на місцевий радіус ($dM \cdot r$).

2.2.17 Метод імпульсу лопаті (МІЛ)

Метод імпульсу лопаті (МІЛ) передбачає, що лопать турбіни поділяється на елементи і розглядається незалежно. Потім сили, що діють на кожен елемент, обчислюються з використанням як аеродинамічних сил на кожен елемент лопаті, так і зміни імпульсу в повітрі. Цей метод в основному базується на теорії елементів лопаті [9,10].

Іншими словами, основна ідея методу МІЛ полягає в тому, щоб розділити лопать на кілька елементів і обчислити аеродинамічні сили та геометрію профілю для кожного елемента. Цей метод є найбільш переважним при проектуванні та аналізі вітрових турбін, оскільки він є надзвичайно швидким і водночас достатньо точним для більшості застосувань. Однак метод МІЛ базується на деяких припущеннях та спрощеннях, які необхідно враховувати:

- стаціонарна ситуація;
- рівномірна швидкість вітру по всьому ротору турбіни;
- відсутність потоку в радіальному напрямку лопаті;
- лопаті мають ідеальну жорсткість і не згинаються;
- лопаті є прямими.

Ці припущення не будуть перевірені у всіх випадках застосування, проте метод МІЛ все одно забезпечує середню продуктивність і буде працювати як метод наближення при проектуванні вітрових турбін. Існують більш просунуті підходи, такі як CFD, але вони виходять за рамки цієї статті.

У висновку можна сказати, що метод МІЛ є чудовим методом наближення, який може бути корисним на початковій стадії проектування, коли необхідно виконати багато обчислень. Тому метод МІЛ є ідеальним інструментом для розрахунку початкового проекту.

Цей код Matlab виконує ітеративний процес на основі початкового проекту, який потрібно оптимізувати. Для проведення аналізу стаціонарного стану лопаті вітрової турбіни необхідна наступна інформація про лопаті:

- Розподіл довжини хорди вздовж лопаті.
- Розподіл скручування вздовж лопаті.
- Розподіл аеродинамічного профілю вздовж лопаті, якщо використовується більше одного аеродинамічного профілю.
- Криві підйомної сили та опору для кожного аеродинамічного профілю. Бажано в діапазоні від -180 до 180 градусів.

2.3 Висновки до розділу

1. Обґрунтовано вимоги до майбутньої конструкції лопатей вітрової турбіни та умов роботи експлуатації.
2. Розкрито основи теорії для розрахунку лопатей вітрової турбіни.

Описано наступні розділи:

- Теорія аеродинамічного профілю;

- Параметри аеродинамічного профілю та лопаті;
 - Вихідна енергія та потужність вітрової турбіни;
 - Характеристики конструкції вітрових турбін;
 - Закон Беца;
 - Отримання максимального коефіцієнта тяги;
 - Модель сліду роторного диска;
 - Теорія імпульсу лопаті.
3. Представлена теорія для розрахунку лопатей вітрової турбіни буде використана для моделювання двохлопатевого вітрової турбіни.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Конструкція лопаті

3.1.1 Алгоритм розрахунку конструкції лопаті

У цьому підрозділі буде представлено процедуру, за допомогою якої було спроектовано та оптимізовано лопать. Першим кроком є створення алгоритму Matlab, що базується на методі імпульсу лопаті (МІЛ), для отримання першої ітераційної моделі лопаті. Після цього здійснюється ітераційний процес між Ashes, Inventor та Excel для досягнення оптимальної конструкції в межах початкових вимог.

Ця процедура покроково проілюстрована на наступному рисунку:

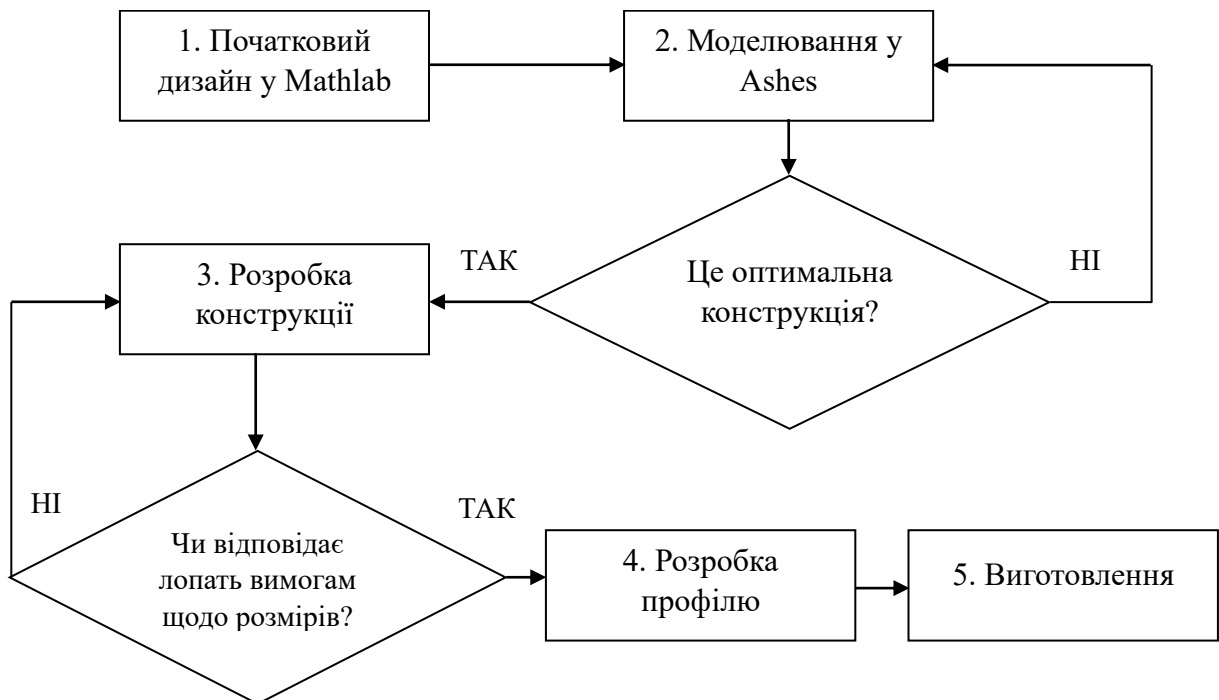


Рисунок 3.1 – Алгоритм процедури проектування лопаті

3.1.2 Проектування в Matlab

3.1.2.1 Основні положення

Спочатку створено код Matlab на основі алгоритму МІЛ. Алгоритм МІЛ розділяє лопать турбіни на елементи і обробляє кожну аеродинамічну поверхню окремо. Таким чином, сили, що діють на кожен елемент, обчислюються з

використанням як аеродинамічних сил на кожному елементі лопаті, так і зміни імпульсу в повітрі, як зазначено в теоретичних основах розрахунку вітрових турбін, описаних в попередньому розділі.

У цьому сенсі, застосовуючи програму Matlab, оцінено розподіл основних вихідних параметрів, таких як довжина хорди та кут скручування, для різних вхідних значень TSR. У цьому сенсі були протестовані різні конструкції для значень TSR від 5,5 до 7,5. Після декількох ітерацій прийнято рішення спроектувати свою лопать для $TSR = 6,5$, що є хорошим компромісом між розміром та ефективністю. Важливо врахувати, що метод імпульсу лопаті дає більші габарити (більшу довжину хорди та вищий кут скручування) для меншого TSR. У цьому сенсі, чим повільніша швидкість обертання турбіни, тим більший розподіл буде представлений.

3.1.2.2 Початкові розрахунки

Початкові розрахунки виконуються шляхом обчисленням кожного елемента лопаті через відхилення коефіцієнтів сили опору. Використовуючи їх, можемо отримати краще рішення з точки зору співвідношення між кутом скручування і довжиною хорди, що дозволило алгоритму МІЛ досягти більш оптимального коефіцієнта продуктивності.

Розрахунки виконані у Matlab за допомогою функції `adisk`.

Теорія ідеального імпульсу лопатевого елемента.

Глауерт назвав цю теорію «теорією лопатевого елемента». Ця теорія полягає у видаленні елементів опору з рівнянь імпульсу. Це ідеальна теорія МІЛ, яка передбачає відсутність опору в кожному з аналізованих елементів. У цьому сенсі коефіцієнти осової та обертальної сили C_a та C_r стають такими:

$$\begin{aligned} C_a &= C_L \cos \phi \\ C_r &= C_L \sin \phi \end{aligned} \tag{3.1}$$

За допомогою цих двох спрощених коефіцієнтів сили ми можемо обчислити нові сили лопатевих елементів. Однак ці елементи все ще є

неявними і тому для їх вирішення потрібна ітерація. Щоб спростити цю задачу, всі фактори, що впливають на сили лопатевих елементів, можна перенести в безрозмірний параметр, який називається параметром лопатевого елемента B_{EP} . Цей параметр визначається наступним чином:

$$B_{EP} = \frac{ZL_c C_L w}{2\pi V_1} \quad (3.2)$$

Цей параметр B_{EP} містить дуже цінні вхідні параметри проектування, такі як швидкість вітру V_t (яка, загалом, повинна бути найпоширенішою швидкістю вітру в даній місцевості), кількість лопатей Z , коефіцієнт підйомної сили C_L та швидкість обертання турбіни w .

Ідеальна теорія імпульсу елемента лопаті реалізована в даній функції MATLAB `adisk`.

У цьому сенсі розроблений алгоритм працює наступним чином:

1. Обчислюється B_{EP} і кут потоку ϕ для певного вхідного TSR і 20 лопатевих елементів, використовуючи та задану функцію `adisk`. Значення цього TSR залежить від критеріїв проектувальника. Однак кількість елементів є компромісом між точністю та роботою конструктора. Чим більше елементів лопаті, тим точнішими будуть розрахунки, але тим більше роботи буде потрібно для проектування 3D-креслення.

2. Обчислюється довжина хорди кожного параметра лопаті за допомогою параметра B_{EP} :

$$B_{EP} = \frac{2\pi B_{EP} V_1}{Z C_L V_1} \quad (3.3)$$

7. Обчислюється кут скручування θ . Це можна зробити наступним чином:

$$\theta = \phi - a_{opt} \quad (3.4)$$

3.1.2.3 Алгоритм

Алгоритм розрахунків наступний (рис.3.2):

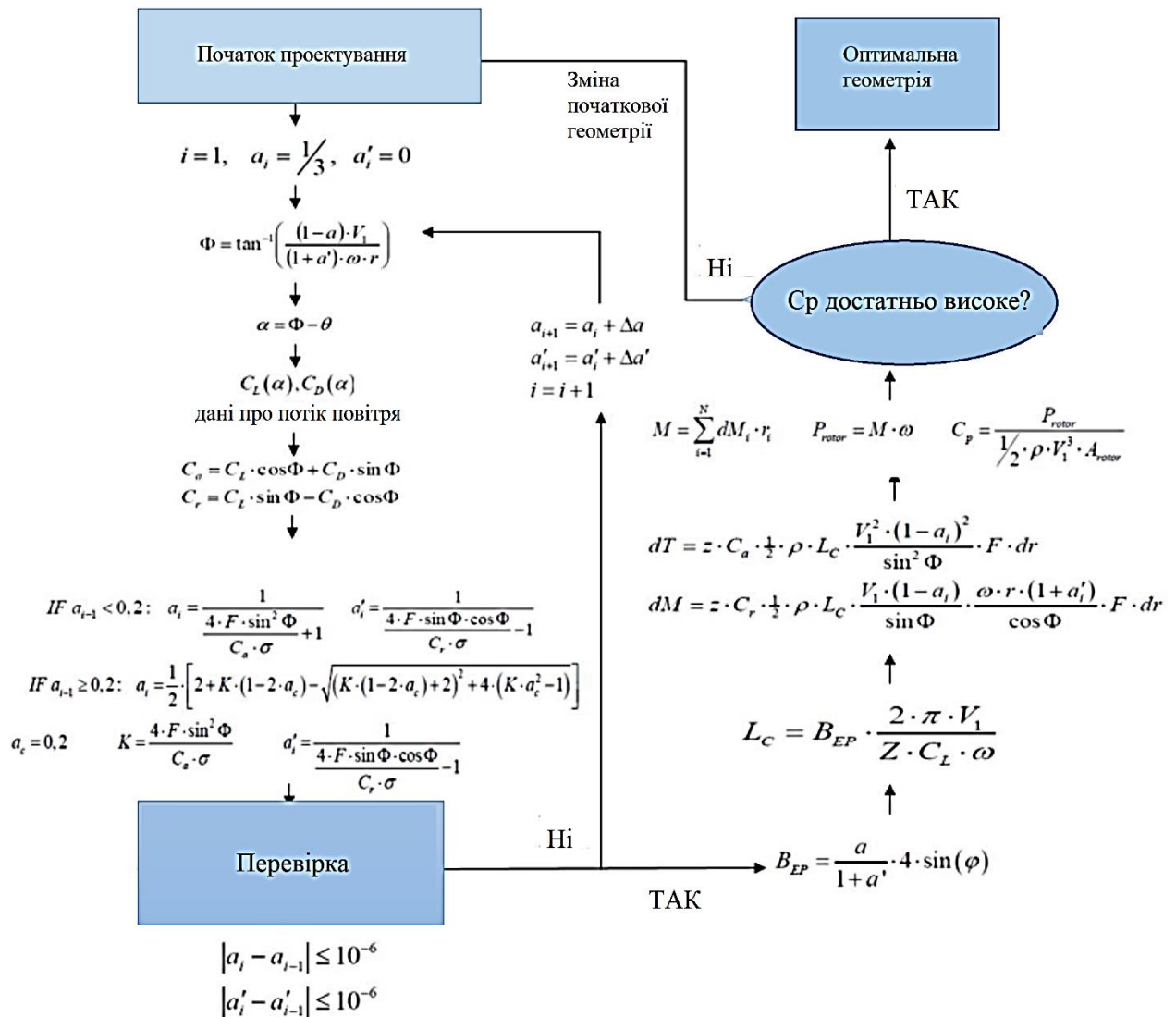


Рисунок 3.2 – Алгоритм розрахунку лопаті. Удосконалення лопатей

Цей алгоритм передбачає деякі спрощення. Ось деякі з найважливіших, які слід взяти до уваги:

- Стаціонарна ситуація. Це припущення означає, що потік навколо лопаті знаходиться в стаціонарному стані. У цьому сенсі втрати через турбулентність не враховуються в цьому методі.

- Рівномірна швидкість вітру над ротором. Це означає, що зсув вітру через ефекти примежового шару також не враховується.
- Теорія МІЛ враховує тільки двовимірний потік. У цьому сенсі потік у радіальному напрямку лопаті відсутній. Це припущення зазвичай дає хороші результати, за винятком кінчика лопаті. Однак нами включено корекційний коефіцієнт у програму Matlab, щоб зробити код більш надійним.
- Лопаті мають ідеальну жорсткість і не згинаються. Це припущення дає досить точне наближення. Однак через це було встановлено мінімальну довжину хорди 20 мм і мінімальну товщину 0,3 мм.

Ці спрощення роблять програму Matlab лише першим наближенням до кінцевої моделі. Хоча ми намагалися зробити програму якомога надійнішою, враховуючи коригувальні коефіцієнти, програма Matlab завжди переоцінювала всі моделі. Таким чином, метою розробки цієї програми Matlab було створення першого проекту лопаті, який потрібно оптимізувати.

Щоб поліпшити цей перший попередній проект, необхідно пройти через більш просунуте програмне забезпечення для моделювання на основі методу скінченних елементів (МСЕ).

3.1.2.4 Результати розрахунків у Matlab

Як було зазначено вище, метою цього розділу є максимальне збільшення коефіцієнта потужності в межах початкових обмежень. Таким чином, був необхідний компроміс між розміром і ефективністю. У цьому сенсі було проведено оцінку різних TSR від 5,5 до 7,5. Таблиця 3.1 містить найважливіші характеристики ротора. Довжина хорди вказана в метрах [м]. Ця конструкція була розрахована з урахуванням оптимального кута атаки вздовж лопаті, який визначається як кут, що відповідає найбільш оптимальному співвідношенню між коефіцієнтом підйомної сили та коефіцієнтом опору. Слід врахувати, що спочатку використано розподіл коефіцієнтів підйомної сили та опору для даного профілю крила NREL 5826.

Таблиця 3.1 – Характеристики ротора Matlab

TSR	C_p	Потужність [кВт]	Крутний момент [Нм]	Тяга [кН]	L_{cmax}	L_{cmin}	n [об/хв]
5,5	0,55	0,22	1,76	0,03	0,1099	0,0383	1167
6	0,51	0,2	1,49	0,03	0,998	0,0323	1273
6,5	0,47	0,18	1,28	0,03	0,93	0,0276	1379
7	0,44	0,17	1,11	0,03	0,0868	0,0238	1485
7,5	0,41	0,16	0,96	0,03	0,081	0,0207	1592

Однак при використанні цього першого розподілу була велика різниця між розрахунками Matlab і моделюванням. Щоб вирішити цю проблему, вирішено використовувати співвідношення підйомної сили, опору і оптимального кута атаки, надані програмним забезпеченням для моделювання. Таким чином, різниця була зведена до мінімуму. У цьому сенсі оптимальний кут атаки, коефіцієнти опору та підйомної сили, які були використані для обчислення цих характеристик, є такими:

Таблиця 3.2 – Аеродинамічні параметри, використані для запуску алгоритму Matlab

C_L	C_D	Оптимальний кут атаки Alphaopt
1,25	0,02	6

Ці співвідношення зазвичай обчислюються за допомогою випробувань в аеродинамічній трубці для заданого профілю крила, і залежно від того, які дані використовуються, остаточне рішення може дещо змінюватися.

Врешті-решт, щоб досягти компромісу між ефективністю та розміром, прийнято рішення обрати **TSR** = 6,5. Таким чином, наведений код Matlab дає наступну попередню геометрію лопаті(табл. 3.3):

Таблиця 3.3 – Геометрія лопатей за даними BEM і Matlab. TSR= 6,5

Геометрія лопаті від BEM та Matlab. TSR=6,5.				
Елемент лопаті	Середній радіус Ri [м]	Довжина хорди [м]	Кут скручування [град]	Кут атаки [град]
1	0,0225	0,0737	42,4453	6
2	0,045	0,093	32,6529	6
3	0,0675	0,0904	25,2568	6
4	0,09	0,0816	19,8305	6
5	0,1125	0,0724	15,8174	6
6	0,135	0,0644	12,7321	6
7	0,1575	0,0573	10,4179	6
8	0,18	0,051	8,69	6
9	0,2025	0,0459	7,2538	6
10	0,225	0,0418	6,0463	6
11	0,2475	0,0383	5,01	6
12	0,27	0,0355	4,1289	6
13	0,2925	0,0331	3,3466	6
14	0,315	0,0312	2,6427	6
15	0,3375	0,0297	1,9894	6
16	0,36	0,0286	1,3554	6
17	0,3825	0,0279	0,6948	6
18	0,405	0,0277	-0,0836	6
19	0,4275	0,0276	-1,263	6
20	0,45	0,0276	-1,263	6

Крім того, ми отримали наступні ключові характеристики вітрової турбіни (рис. 3.3 і 3.4)

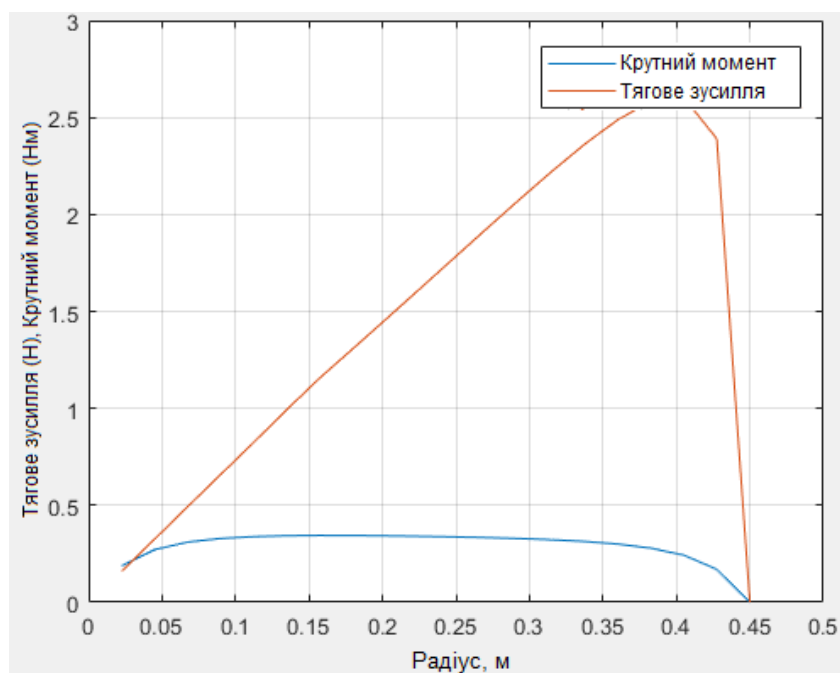


Рисунок 3.3 – Крутий момент і тягове зусилля на кожній секції лопаті

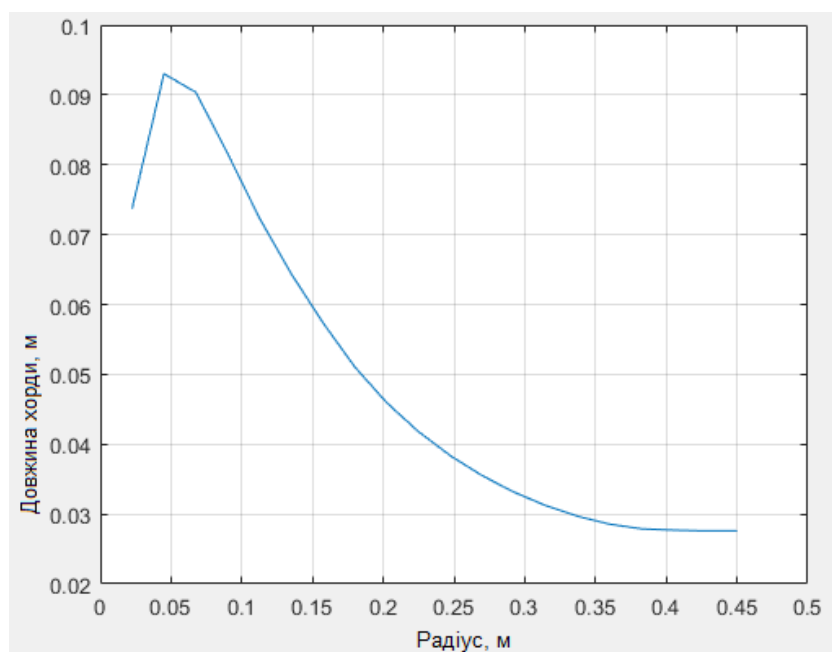


Рисунок 3.4 – Розподіл довжини хорди на кожній лопаті

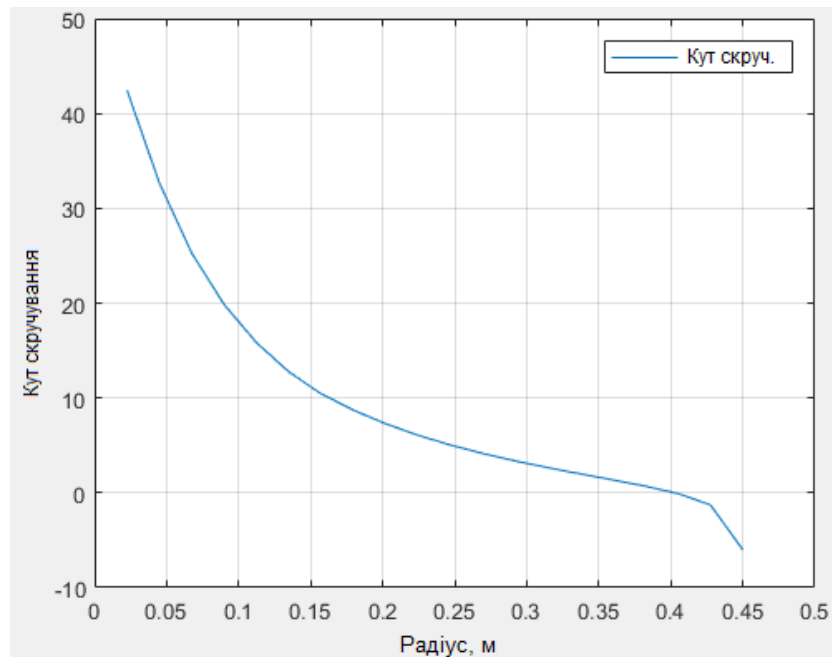


Рисунок 3.5 – Кут скручування на кожному середньому радіусі

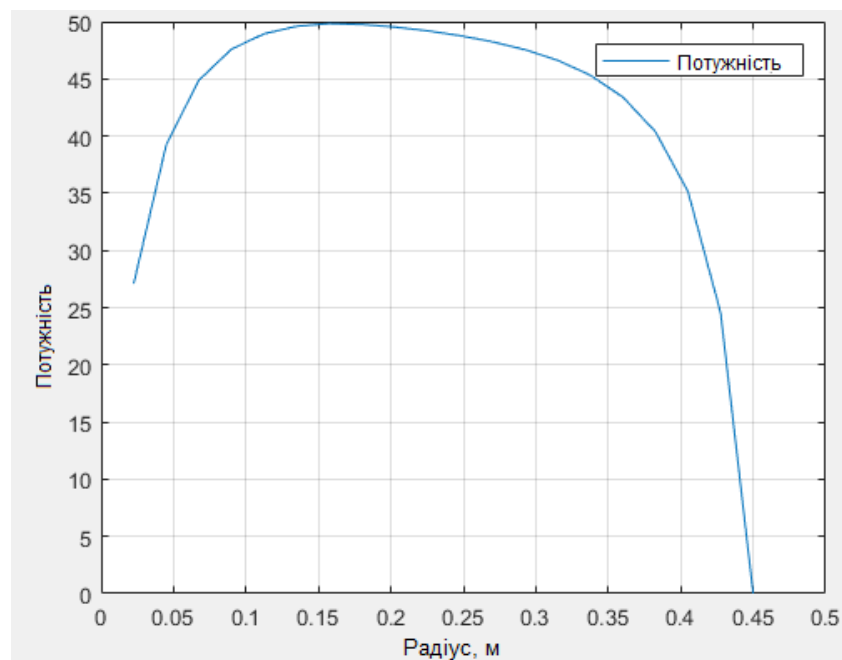


Рисунок 3.6 – Вихідна потужність на кожному середньому радіусі

У результаті, код Matlab і метод МІЛ дають попередній розрахунок, який необхідно продовжувати оптимізувати за допомогою більш точних методів. Хоча найпоширенішим застосуванням методу МІЛ є аналіз лопатей вітрових турбін, він також є хорошим початковим інструментом, який можна включити в методи проектування лопатей турбін завдяки його точності та швидкості.

Остаточне рішення було обрано як компроміс між ефективністю, розміром і опором. Хоча більші конструкції давали кращі коефіцієнти потужності, ми вирішили зупинитися на проміжному варіанті, щоб уникнути проблем з розмірами під час проектування в Inventor. Однак, як зазначалося раніше, цей код не дає оптимального проекту, і для перевірки продуктивності турбіни потрібен більш складний ітераційний процес. У цьому сенсі невеликі зміни в геометрії лопаті можуть призвести до більш оптимального проекту.

3.2 Проектування в Ashes і Excel

3.2.1 Основні положення

Для перевірки та ітерації цієї першої попередньої геометрії лопаті, наданої кодом Matlab, було використано програму моделювання під назвою Ashes. Ashes (Aero-Servo-Hydro-Elastic Simulation) — це програмний код для аероеластичного аналізу, розроблений Simis AS. Ashes використовує метод скінченних елементів (МСЕ) у поєднанні з формулюванням ко-ротаційних елементів балки для визначення динамічної реакції конструкції. Формулювання ко-ротаційних елементів дає точні результати при довільно великих зміщеннях і обертаннях у просторі. Наприклад, відцентрові сили природно виникають, наприклад, у лопатках. лінійне рішення рівнянь руху може бути використане у випадках, коли нелінійні ефекти не мають значення, тоді як повна ітераційна схема Ньютона-Рафсона може бути використана, коли нелінійні ефекти мають значення. Ashes автоматично вибирає відповідний вирішувач на основі моделі, типу аналізу та характеристик випадків навантаження. Лінеаризоване вигин може бути додатково досліджене. Аеродинамічні навантаження визначаються за допомогою методу імпульсу лопаті (МІЛ), яка повністю пов'язана з реакцією конструкції. Ashes включає моделі втрат через наявність вежі та маточини, а також втрат на кінці лопаті. Підтримуються моделі постійного вітру, відхиленого припливу, зсуву вітру та різні моделі турбулентності. Хвильові

навантаження обчислюються за допомогою рівняння Морісона в поєднанні з реакцією конструкції [11].

Це програмне забезпечення широко використовується як для проектування турбін і генераторів, так і для їх з'єднання. У цьому сенсі, щоб імпортувати лопать в Ashes, був створений текстовий файл з розподілом довжини хорди і кута скручування, отриманий з програми Matlab для спроектованого $TSR = 6,5$.

Ця програма допомагає конструктору в проектуванні як генератора, так і ротора. Крім того, вона дає можливість проаналізувати поведінку лопаті в різних ситуаціях. Більше того, Ashes дає нам можливість перевірити трикутник швидкості та аеродинамічні характеристики кожного елемента лопаті. Ця функція показана на рисунку 3.7.

Ця програма була використана для створення ітераційного процесу та перевірки, як невеликі зміни в геометрії лопаті можуть збільшити значення C_p . Основна мета під час цієї частини розрахунків – отримати найвище значення C_p , яке, на жаль, обмежене межею Беца (значення близько 59%). Хоча для створення остаточної моделі було зроблено велику кількість ітерацій, ця робота зосереджена на остаточному рішенні. У цьому сенсі буде представлена тільки остаточна геометрія турбіни.

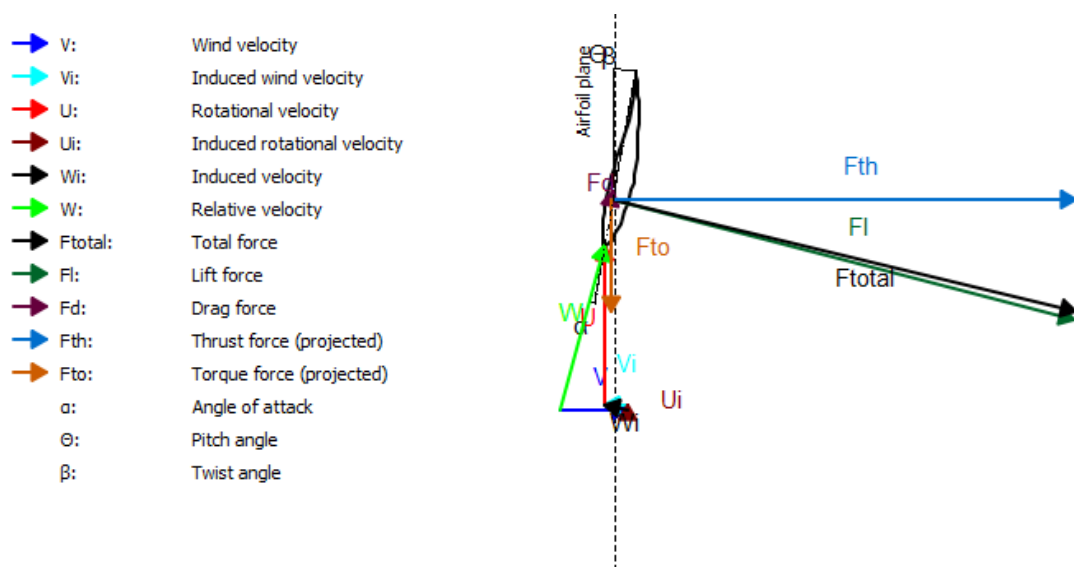


Рисунок 3.7 – Трикутники швидкості вітру Ashes

3.2.2 Введення даних в Ashes

Для впровадження попереднього проекту лопаті, створеного в Matlab, в програму Ashes, було необхідно створити текстовий файл, як показано на рисунку X. Потім цей текстовий файл було модифіковано, випробувавши різні довжини хорди та кути скручування. З іншого боку, було створено таблицю Excel для збереження плавного профілю під час ітерацій.

```

1  ----- ASHES BLADE DEFINITION INPUT FILE -----
2  Output format based on AeroDyn v15.03
3  ===== Airfoil Information =====
4  1 NumAF - Number of airfoils used (-)
5
6  "S826"
7  ===== Blade Properties =====
8  22 NumBlNds - Number of blade nodes (-)
9  BlSpn  BlCrvAC  BlSwpAC  BlCrvAng  BlTwist  BlChord  BlAFID  BlRelThick  BlPAD
10 (m) (m) (m) (deg) (deg) (m) (-) (-) (-)
11
12
13 0.0450 0 0 0.0 23.2568 0.090000 1 0.140381 0.333333
14 0.0675 0 0 0.0 19.3000 0.089000 1 0.140381 0.333333
15 0.0900 0 0 0.0 15.8175 0.083600 1 0.140381 0.333333
16 0.1125 0 0 0.0 12.7321 0.074400 1 0.140381 0.333333
17 0.1350 0 0 0.0 10.4179 0.066400 1 0.140381 0.333333
18 0.1575 0 0 0.0 8.69000 0.059300 1 0.140381 0.333333
19 0.1800 0 0 0.0 7.25380 0.053000 1 0.140381 0.333333
20 0.2025 0 0 0.0 6.04630 0.047900 1 0.140381 0.333333
21 0.2250 0 0 0.0 5.01790 0.043800 1 0.140381 0.333333
22 0.2475 0 0 0.0 4.12890 0.041300 1 0.140381 0.333333
23 0.2700 0 0 0.0 3.34660 0.039600 1 0.140381 0.333333
24 0.2925 0 0 0.0 2.64270 0.038800 1 0.140381 0.333333
25 0.3150 0 0 0.0 1.98940 0.038200 1 0.140381 0.333333
26 0.3375 0 0 0.0 1.35540 0.037600 1 0.140381 0.333333
27 0.3600 0 0 0.0 0.69480 0.037200 1 0.140381 0.333333
28 0.3825 0 0 0.0 0.15000 0.036800 1 0.140381 0.333333
29 0.4050 0 0 0.0 -0.2500 0.036400 1 0.140381 0.333333
30 0.4275 0 0 0.0 -0.6000 0.036000 1 0.140381 0.333333
31 0.4500 0 0 0.0 -0.7500 0.035600 1 0.140381 0.333333

```

Рисунок 3.8 – Приклад текстового файлу для введення профілю лопаті в Ashes

За допомогою цього текстового файлу Ashes зміг створити геометрію лопаті. Після цього ми могли застосувати широкий діапазон тестових параметрів, таких як: швидкість вітру, кількість лопатей, розмір, TSR і багато іншого. Крім того, це дає нам можливість аналізувати характеристики ротора.

Результати Ashes є більш точними, ніж результати програми Matlab, оскільки вони використовують більш складні та точні обчислення. Однак результати Matlab не сильно відрізнялися від симуляцій, реалізованих Ashes. Хоча метод МІЛ дає оптимальний профіль, наш дизайн можна поліпшити, трохи змінивши кут скручування та довжину хорди. Загалом, чим більша довжина хорди, тим більша потужність і кращий СР (коефіцієнт

продуктивності). Однак при проектуванні необхідно враховувати вимоги до розміру. Ці вимоги були занадто суворими і ускладнювали компроміс між розміром і ефективністю.

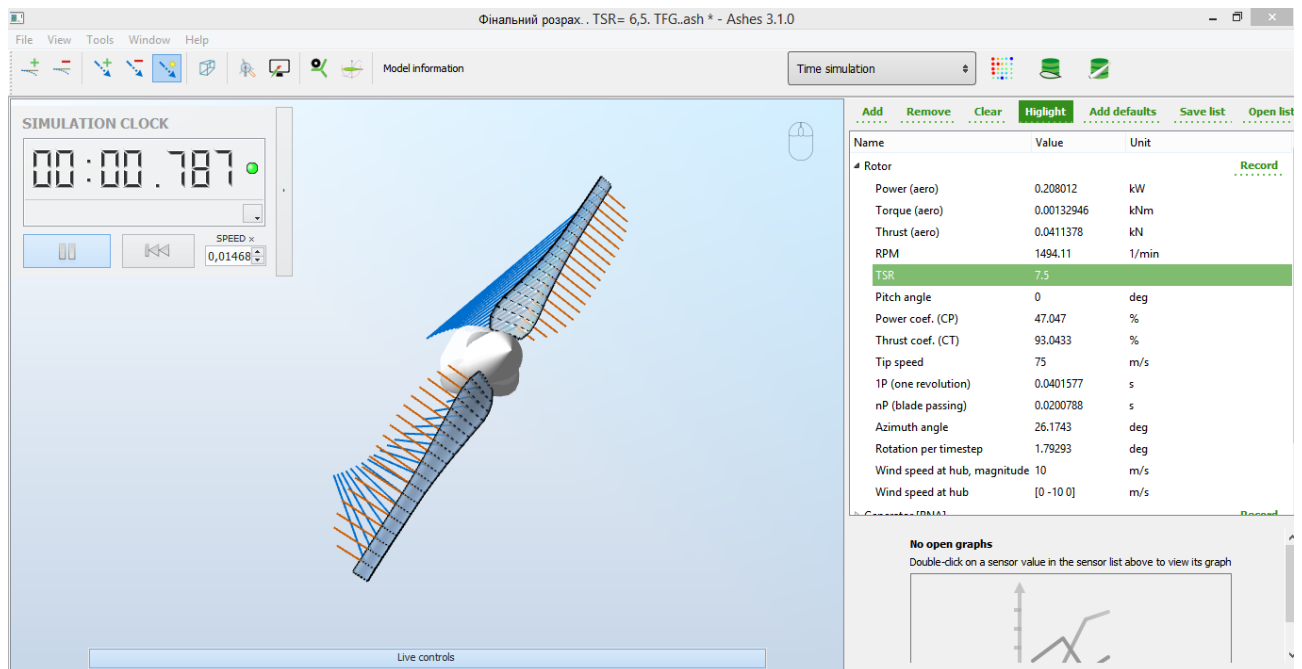


Рисунок 3.9 – Приклад моделювання Ashes

3.2.3 Процес ітерації у Ashes і Excel

Наступним кроком є початок процесу проб і помилок за допомогою Excel і Ashes. Програма Excel використовується для підтримки плавного профілю під час ітераційних змін. Плавний профіль важливий з двох причин: по-перше, тому що аеродинаміка любить плавні краї, а по-друге, тому що ми запобігаємо поломці лопаті в процесі фрезерування. Рисунок 3.10 ілюструє процес ітерації у вигляді алгоритму:.

Ці дві програми були використані для оптимізації першого попереднього проекту. Першим кроком для цього було обчислення характеристик ротора після включення турбіни в Ashes. Зробивши це в розділі, ми виявили першу відмінність порівняно з попереднім проектом.

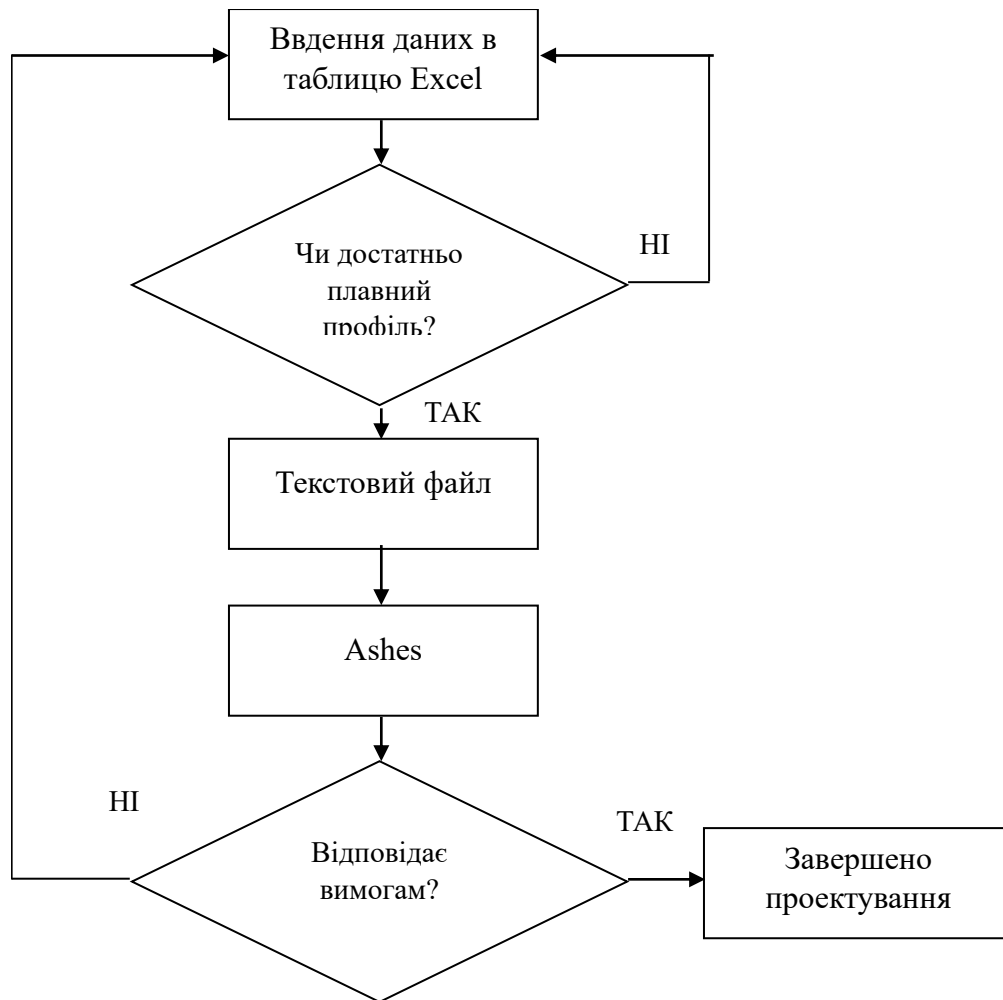


Рисунок 3.10 – Алгоритм ітерації Ashes і Excel для обчислення остаточного проекту

Першою відмінністю, виявленою між розрахунками Matlab і Ashes, було різне значення оптимального TSR і, отже, швидкості обертання для спроектованого ротора. Дійсно, хоча лопать спочатку була оптимізована для $TSR = 6,5$ в Matlab, оптимальне значення C_p відповідало TSR, близькому до 7-7,5.

Оскільки розрахунки Ashes є більш досконалыми, прийнято рішення зберегти геометрію лопаті, задану Matlab, але врахувати оптимальне значення TSR, розраховане Ashes. Характеристики ротора попереднього проекту показані на наступному графіку (рис.3.11)

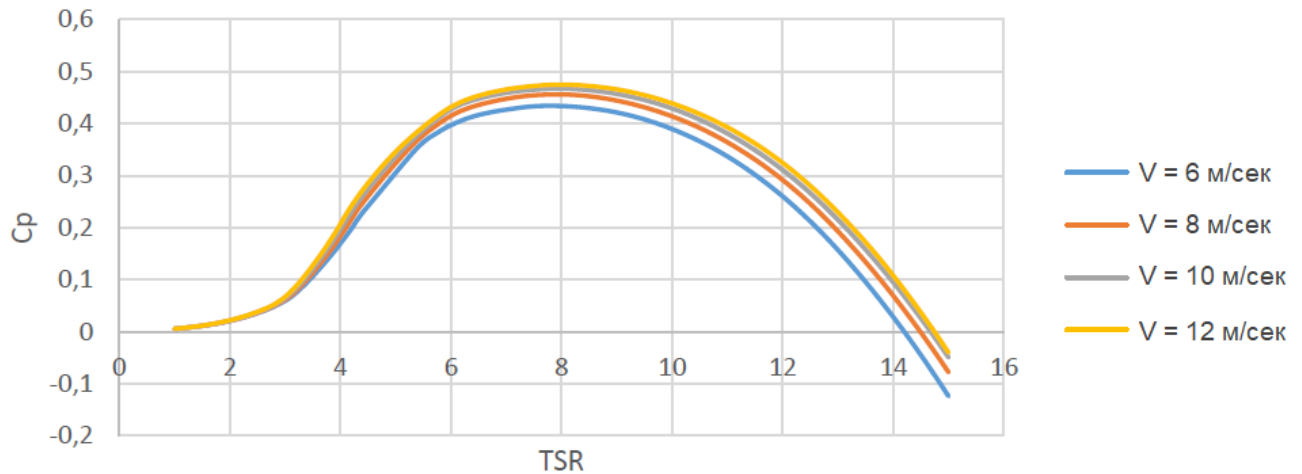


Рисунок 3.11 – Коефіцієнт потужності першого проекту

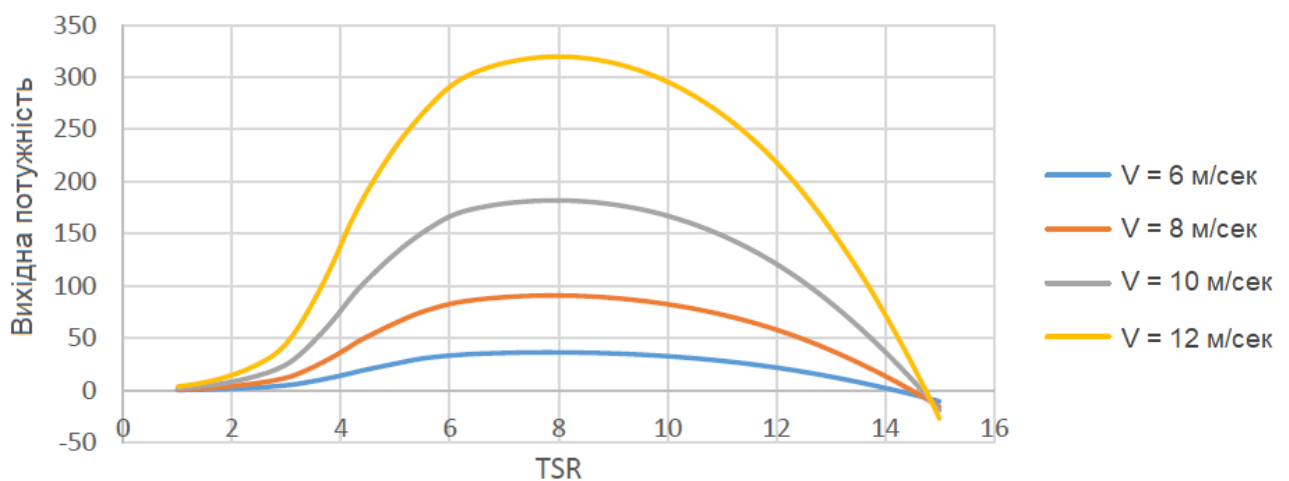


Рисунок 3.12 – Вихідна потужність першого проекту

Слід звернути увагу, що всі зміни геометрії, реалізовані під час ітераційного процесу, були визнані достатньо невеликими, щоб припустити, що всі проекти мають оптимальне $TSR \approx 7$. Отже, оскільки тепер всі розрахунки та ітерації будуть виконуватися з урахуванням оптимального $TSR = 7$.

Тому в Excel було розроблено два графіки та таблицю, щоб забезпечити плавність довжини хорди та кута скручування під час внесення змін. У цьому сенсі першим кроком процесу було забезпечення плавності лопаті.

Після цього нова геометрія була записана в текстовий файл, а новий дизайн імпортований в Ashes. За допомогою Ashes ми могли перевірити, чи зміни досягають більш оптимального дизайну з точки зору компромісу між розміром і коефіцієнтом потужності (C_p).

У цьому сенсі в попередніх моделях були зроблені невеликі зміни, поки не було знайдено найкраще рішення. Після декількох ітерацій було виявлено, що невеликі зміни довжини хорди були ефективнішими, ніж кут скручування, при оптимізації коефіцієнта потужності. Більше того, чим більша довжина хорди, тим вона міцніша. Це добре як для процесу фрезерування, так і для умов випробувань. Однак опір навантаження лопаті, як передбачається, вже фіксований заданими обмеженнями мінімальної товщини та мінімальної довжини хорди.

Отже, прийнято рішення зосередити процес ітерації на довжині хорди, а не на куті скручування. Однак для досягнення остаточного дизайну були також внесені деякі невеликі зміни в кут скручування, але цей параметр можна вважати менш важливим в процесі ітерації.

Таким чином, не слід забувати про обмеження розмірів, зокрема біля основи лопаті, де була велика довжина хорди і велике значення кута скручування. У цьому сенсі прийнято рішення трохи зменшити скручування, щоб трохи збільшити довжину хорди.

Таким чином, після декількох ітерацій було отримано остаточну геометрію. Ця остаточна модель наведена в таблиці 3.4.

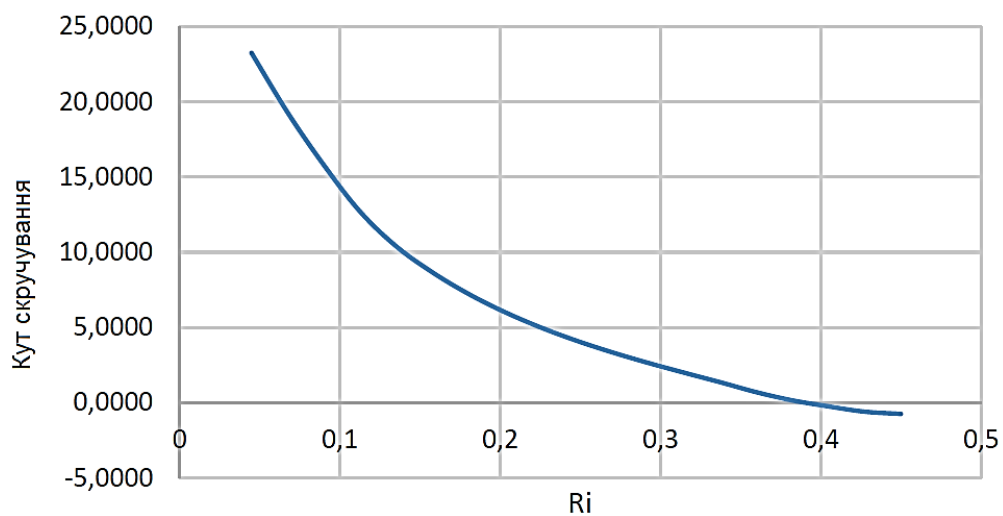


Рисунок 3.13 – Розподіл кута скручування при остаточній ітерації

Таблиця 3.4 – Модифікації Таблиця Excel для збереження плавного профілю лопаті при кожній ітерації. Ці ілюстровані результати взяті з остаточного проекту

Профіль крила. TSR = 7,0. TFG. Таблиця змін			
Елемент	Ri	Кут скручування	Довжина хорди [м]
2	0,045	23,2568	0,09
3	0,0675	19,3	0,089
4	0,09	15,8175	0,0836
5	0,1125	12,7321	0,0744
6	0,135	10,4179	0,0664
7	0,1575	8,69	0,0593
8	0,18	7,2538	0,053
9	0,2025	6,0463	0,0479
10	0,225	5,0179	0,0438
11	0,2475	4,1289	0,0413
12	0,27	3,3466	0,0396
13	0,2925	2,6427	0,0388
14	0,315	1,9894	0,0382
15	0,3375	1,3554	0,0376
16	0,36	0,6948	0,0372
17	0,3825	0,15	0,0368
18	0,405	-0,25	0,0364
19	0,4275	-0,6	0,036
20	0,45	-0,75	0,0356

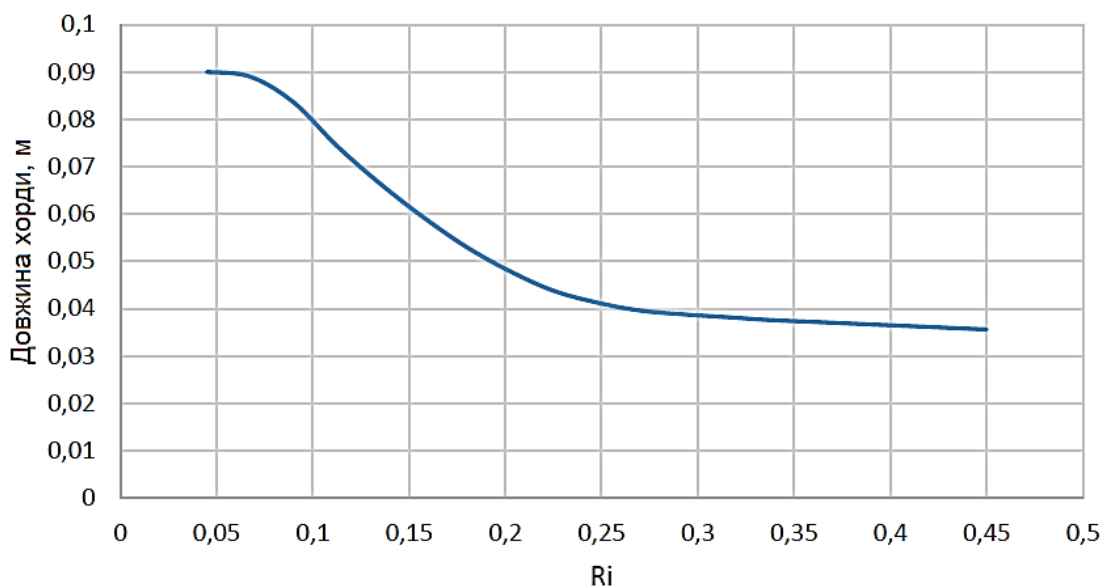


Рисунок 3.14 – Розподіл довжини хорди при остаточній ітерації

Зверніть увагу, що перший елемент лопаті був видалений, щоб надати додатковий простір для хабу.

3.3 Проектування в Autodesk Inventor

3.3.1 Основні положення

Після вибору остаточного оптимальної геометрії лопаті створено 3D-модель остаточного проекту за допомогою Autodesk Inventor Professional. Autodesk Inventor Professional — це програмне забезпечення для 3D-моделювання твердих тіл, яке широко використовується в усьому світі.

Використано Inventor для створення 3D-креслення та складання турбіни. У цьому сенсі ця програма відповідала за перевірку дотримання суворих вимог до розмірів. Таким чином, слід знайти відповідний баланс між розміром, міцністю та ефективністю. Щоб перевірити, чи відповідає турбіна розмірним обмеженням, слід перевірити, чи поміщається збірка турбіни в прямокутник розміром $1000 \cdot 100 \cdot 10$ мм.

В кінцевому результаті використано геометрію з таблиці 3.4, щоб створити остаточний проект вітрової турбіни.

3.3.2 Імпорт лопаті в Autodesk Inventor

Щоб імпортувати геометрію лопаті в Inventor, необхідно було зберегти остаточну геометрію у вигляді файлу Step. Це можна було легко зробити за допомогою Ashes. Цей файл Step завантажить в Inventor розподіл геометрії лопаті, що не є твердим тілом. Цей файл Step показаний на рисунку 3.15.

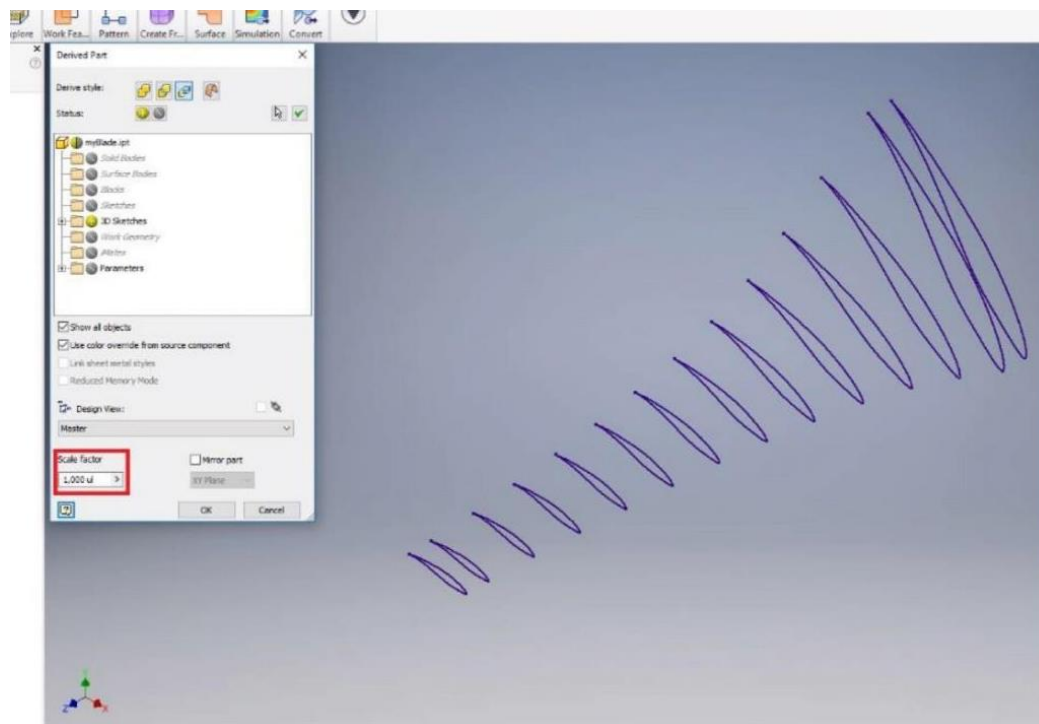


Рисунок 3.15 – Геометрія лопаті у форматі файлу Step, експортованому в Inventor

3.3.3 Процес моделювання та результати

Остаточний проект та його збірка представлені на рис.3.16.

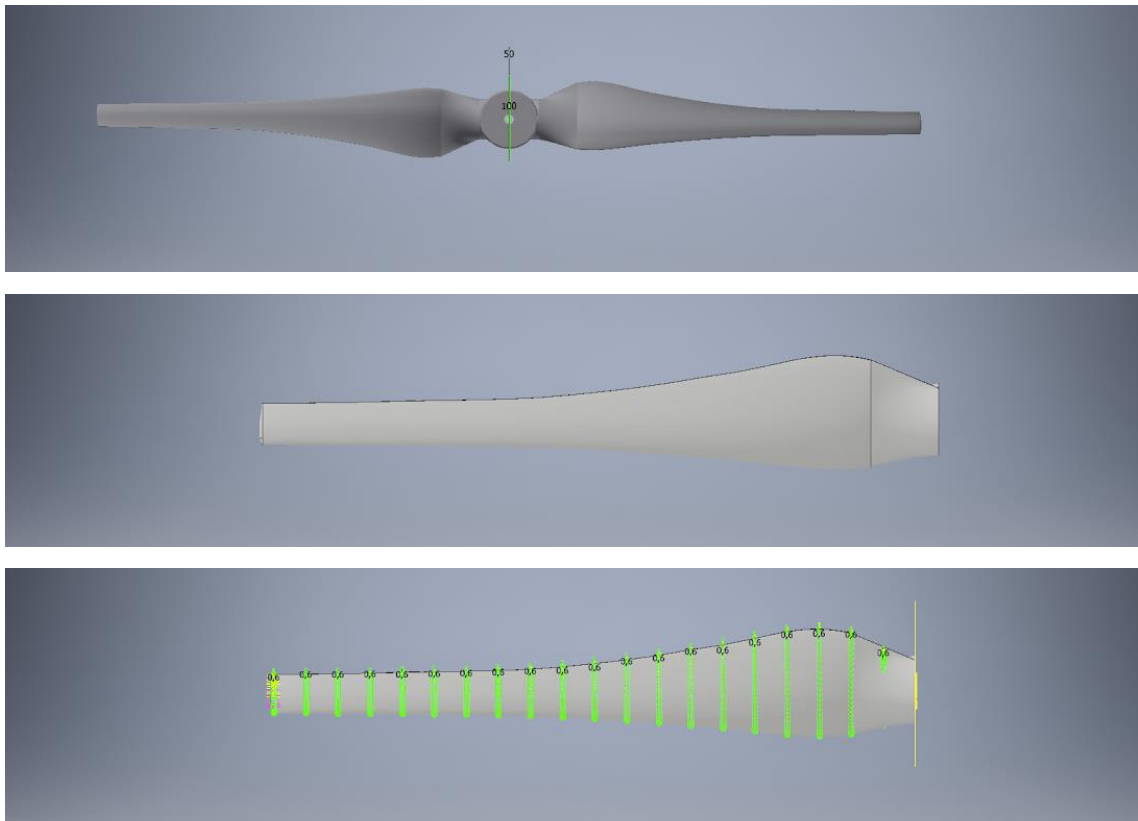


Рисунок 3.16 – Остаточний 3D-креслення, створене за допомогою Inventor. Екструзія лопаті та складання турбіни

Першим кроком після імпорту розподілу геометрії лопаті є створення індивідуального 3D-ескізу для кожного елемента лопаті. Це необхідно зробити для кожного елемента лопаті, щоб можна було екструдувати турбіну і зробити її твердою. Зверніть увагу, що Inventor повинен дотримуватися послідовності 3D-ескізів, щоб можна було виконати екструзію за допомогою функції Loft.

Це логічно, оскільки дві секції лопаті в одному ескізі призведуть до математичної невизначеності і, отже, до помилки екструзії.

Після цього необхідно було модифікувати всі 3D-ескізи, щоб забезпечити мінімальну товщину лопаті, яка становить 0,6 мм. Для цього було проаналізовано край профілю, щоб відхилити профіль лопаті, тонший за 0,6 мм. Таким чином, для кожного елемента лопаті з краями, тоншими за мінімальну товщину, було розроблено 2D-ескіз. Ці 2D-ескізи слугували для виконання розрізів і відхилення профілю, який не відповідав обмеженню. Ця процедура проілюстрована на рис.3.17.

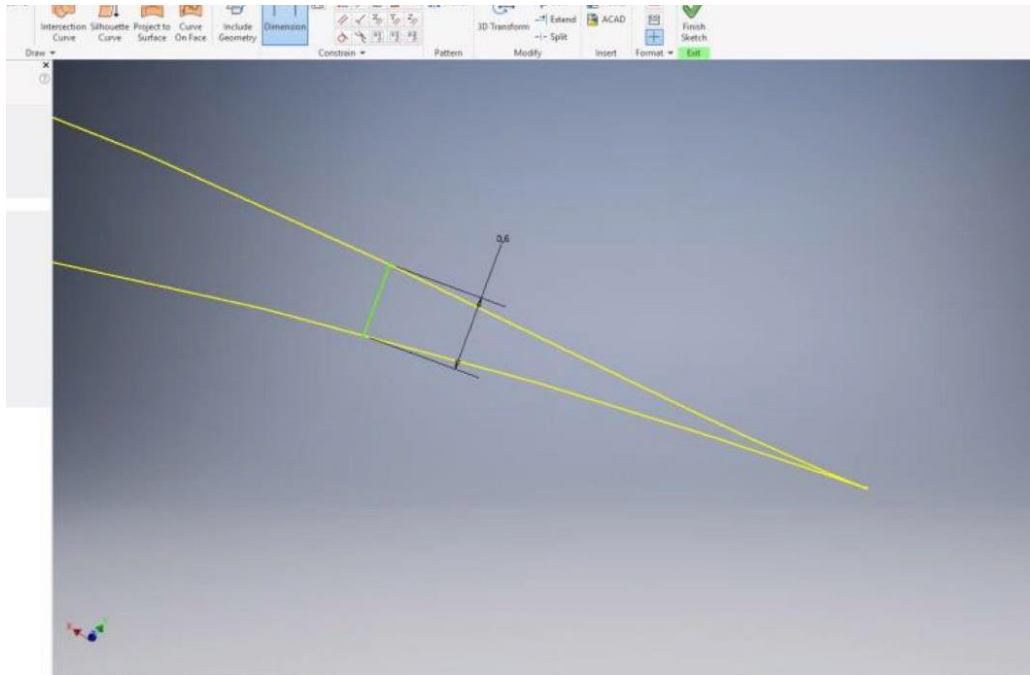


Рисунок 3.17 – Процедура корекції мінімальної товщини

З іншого боку, виконано 3D-лофт на кінчику лопаті, щоб отримати більш плавний профіль і уникнути втрат навколо нього. Це запобіжить затримці вивільнення примежового шару, і потік не буде перетікати з однієї частини лопаті на іншу. Кінцевий результат представлений на рисунку 3.18.

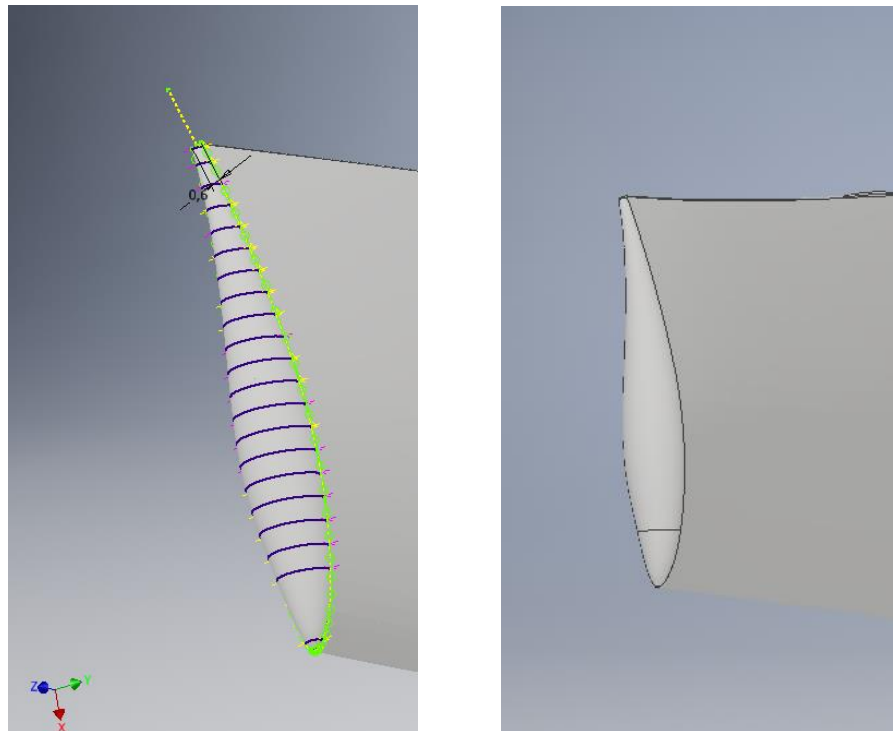


Рисунок 3.18 – Екструзія кінчика лопаті для створення більш плавного профілю

Після цього останнім кроком у створенні лопаті було закруглення країв. Це було зроблено, щоб уникнути проблем під час процесу фрезерування. Це показано на рисунку 3.19.

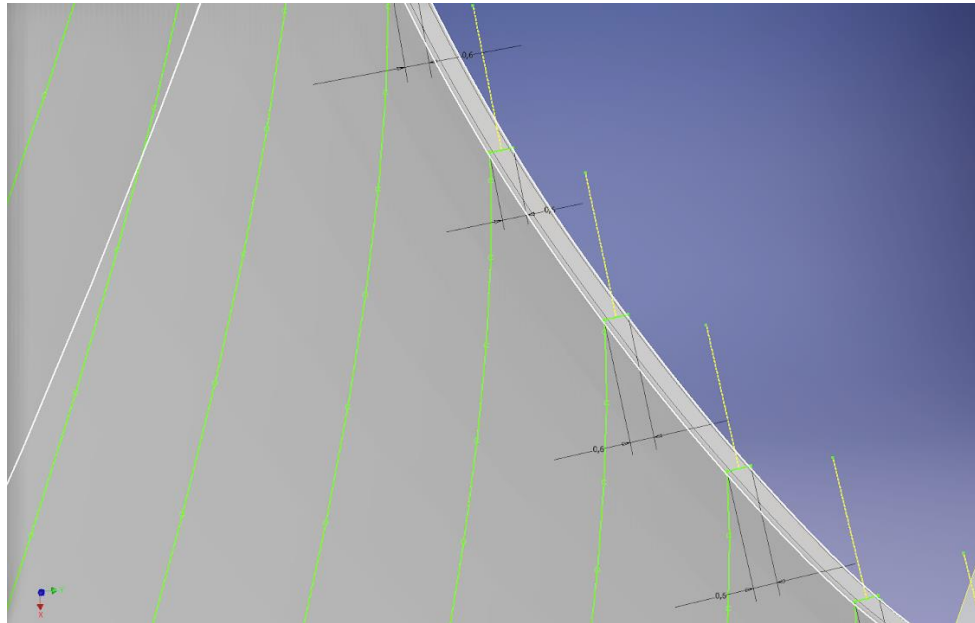


Рисунок 3.19 – Процедура заокруглення для забезпечення якісного виробничого процесу та більш плавного профілю

Отримані результати разом із тими, що є у роботах [12-15] будуть корисними при проектуванні нових вітроустановок.

3.4 Висновки до розділу

1. На основі теорії, описаної у другому розділі, запропоновано алгоритм розрахунку конструкції лопаті. Який реалізований у пакеті прикладних програм для чисельного аналізу Matlab.
2. В результаті розрахунків отримано ключові характеристики вітрової турбіни, а саме крутний момент і тягове зусилля на кожній секції лопаті, кут скручування, вихідна потужність та інші.
3. Для перевірки розрахунку попередньої геометрії лопаті, проведеної у Matlab, було використано програму моделювання Ashes. Розроблено алгоритм процесу визначення найбільш ефективної геометрії лопаті.

Після декількох циклів розрахунків було виявлено, що невеликі зміни довжини хорди були ефективнішими, ніж кут скручування, при оптимізації коефіцієнта потужності. Більше того, чим більша довжина хорди, тим вона міцніша.

4. Після вибору остаточного оптимальної геометрії лопаті створено 3D-модель вітрової турбіни за допомогою Autodesk Inventor Professional.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [16].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, токопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтнопрофілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.2 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується[16]:

- 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.

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час

На основі всебічного аналізу факторів, що впливають на стійкість роботи об'єктів енергетики, робляться висновки про ймовірність виникнення аварій, стихійних лих, терористичних актів та їх впливу на виробничу діяльність і визначаються основні напрямки (шляхи) підвищення стійкості функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу [17]:

1. Забезпечення надійного захисту робітників та службовців від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих і засобів ураження

2. Захист основних виробничих фондів від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих та засобів ураження, в тому числі і від вторинних вражаючих факторів;

3. Забезпечення стабільності і безперервності управління виробництвом та ЦЗ;

4. Забезпечення надійності постачання об'єкта енергоносіями.

Для надійного функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях завчасно організовуються і проводяться заходи, спрямовані на підвищення стійкості їх роботи. До них відносяться:

1. Інженерно-технічні заходи (ІТЗ).

2. Технологічні заходи.

3. Організаційні заходи.

Інженерно-технічні заходи – заходи, спрямовані на забезпечення підвищення стійкості будівель, споруд, обладнання, енергетичних систем до впливу НС.

Технологічні заходи – заходи, спрямовані на здійснення підвищення стійкості шляхом зміни технологічного режиму, що виключає виникнення вторинних факторів ураження.

Організаційні заходи – заходи, спрямовані на завчасну розробку і планування дій керівного складу, особового складу, штабу ЦЗ, служб, невоєнізованих формувань об'єктів енергетики в умовах надзвичайних ситуацій.

Основними напрямками підвищення стійкості функціонування є наступне:

- забезпечення захисту населення і його життєдіяльності;
- раціональне розміщення виробничих сил та потужностей на території об'єкта енергетики, регіону;
- підготовка до роботи в умовах НС мирного та воєнного часу;
- підготовка до виконання робіт по відновленню об'єктів в умовах НС;

- підготовка системи управління.

Всі ці заходи повинні забезпечити максимально можливе зниження втрат і руйнувань та зменшити можливість виникнення повторних зон зараження при впливі РР, ОР та НХР. Зміст таких заходів, виходячи з галузевих і інших нормативних документів, конкретизується для кожної територіальної ланки..

Ми знаємо, що електропостачання є основою всякого виробництва. Для забезпечення надійного електропостачання в НС при його проектуванні та будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги, що впливають із завдань цивільного захисту:

1. Електропостачання повинно здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива.

2. Великі електростанції слід розміщувати одну від одної і від великих міст на значних відстанях.

3. Районні понижуючі підстанції, диспетчерські пункти енергосистем та лінії електропередач необхідно розміщувати розсереджено і надійно захищати.

4. Постачання електроенергією великих міст слід передбачати від двох незалежних джерел.

Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати рухливі електростанції на залізничних платформах, малопотужні електростанції, не включені до енергосистеми. Система електропостачання повинна мати грозозахисту систему та захист від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху.

Енергетичні споруди та електричні мережі повинні проектуватися з урахуванням забезпечення стійкого електропостачання категорійних міст і об'єктів. Схема електричних мереж енергосистем при необхідності повинна передбачати можливість автоматичного розподілу енергосистеми на збалансовані, незалежно працюючі частини. При проектуванні енергетичних систем і їхнього об'єднання теплові (конденсаційні) електростанції слід розміщати поза зонами можливого катастрофічного затоплення. У категорійних

містах припускається розміщення тільки теплоелектроцентралей незалежно від їхньої встановленої потужності з максимальним віддаленням їх від центрів житлової і промислової забудов. Нові атомні електростанції та атомні теплоелектроцентралі повинні розміщатися з урахуванням їх впливу на навколишнє середовище і радіаційну безпеку населення. На існуючих та на тих, що проектуються і будуються атомних станціях, передбачається створення систем автоматизованого контролю за радіаційною обстановкою на території станції і в зоні спостереження цих станцій, оповіщення та інформаційного забезпечення обслуговуючого персоналу і населення про радіаційну небезпеку, а також захищених пунктів керування протиаварійними діями на території станції і в пристанційних селищах.

При проектуванні схем зовнішнього електропостачання категорійних міст необхідно передбачати їхнє електропостачання від декількох незалежних та територіально рознесених джерел живлення (електростанції і підстанції), частина з яких повинна розташовуватися за межами зон можливих руйнувань. При цьому зазначені джерела і їхні лінії електропередачі повинні, як правило, знаходитися на відстані одне від одного, що виключає можливість їхнього одночасного виходу з ладу. Системи електропостачання категорійних міст повинні враховувати можливість забезпечення транзиту електроенергії в обхід зруйнованих об'єктів за рахунок спорудження коротких перемичок повітряними лініями електропередачі. Нові лінії електропередачі, що живлять особливо важливих споживачів, слід проектувати в кабельному виконанні. Для забезпечення можливості зниження електричного навантаження в категорійних містах системи електропостачання об'єктів, які не відключаються у воєнний час, повинні бути відділені від систем електропостачання інших об'єктів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі представлено загальний огляд, розрахунок та 3D проектування невеликої горизонтальної дволопатевої вітрової турбіни.

1. Проведено аналіз історичного становлення вітроенергетики у світі та основні типи вітрових турбін. Наведено огляд нових технологій, які використовуються в сучасних вітрогенераторах.
2. Встановлено, що правильно спроектована конструкція лопаті забезпечує оптимальну швидкість обертання та крутний момент.
3. Обґрунтовано вимоги до конструкції лопатей вітрової турбіни відповідно умов експлуатації.
4. На основі теорії, описаної у другому розділі, запропоновано алгоритм розрахунку конструкції лопаті, який реалізований у пакеті прикладних програм для чисельного аналізу Matlab.
5. В результаті розрахунків отримано ключові характеристики вітрової турбіни, а саме крутний момент і тягове зусилля на кожній секції лопаті, кут скручування, вихідна потужність та інші.
6. Для перевірки розрахунку попередньої геометрії лопаті, проведеної у Matlab, було використано програму моделювання Ashes. Розроблено алгоритм процесу визначення найбільш ефективної геометрії лопаті. Після декількох циклів розрахунків було виявлено, що невеликі зміни довжини хорди були ефективнішими, ніж кут скручування, при оптимізації коефіцієнта потужності. Більше того, чим більша довжина хорди, тим вона міцніша.
7. Після вибору остаточного оптимальної геометрії лопаті створено 3D-модель вітрової турбіни за допомогою Autodesk Inventor Professional.
8. Встановлено, що вітрова турбіна запропонованої геометрії може досягати коефіцієнта потужності близько 48 %, що є значенням, близьким до того, яке пропонують виробники промислових вітрових турбін. Більше того, загальний ККД буде знаходитися в межах 37-40%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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.

2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.

3. 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.

4. 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.

5. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакumuлюючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, 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. 71.

6. Dixon, S. L., & Hall, C. (2013). Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. Butterworth-Heinemann.

7. Hywind Scotland. https://en.wikipedia.org/wiki/Hywind_Scotland.
8. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). Handbook of wind energy.
9. Phelps, C., & Singleton, J. (2011). Wind turbine blade design. Cornell University, M. Eng. Report.
10. Chattot, J. J. (2011). Wind turbine aerodynamics: analysis and design. International Journal of Aerodynamics, 1(3-4), 404-444.
11. Blazing fast wind turbine analysis. https://www.simis.io/#Products_Ashes_Technicalspecifications.
12. 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.
13. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.
14. 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.
15. 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.

16. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

17. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

Додаток А

```

%Метод імпульсу елемента лопаті (BEM)
очистити все; clc;
%Параметри
D=0.9; %Діаметр ротора (лопаті + хаб)
V=10; %Швидкість вітру
TSR=6.5; %Коефіцієнт швидкості наконечника, співвідношення між швидкістю наконечника та швидкістю вітру
R=D/2; %Радіус ротора (лопаті + хаб)
omega=TSR*V/R; %Кутова швидкість ротора
Z=2; %Кількість лопатей
N=20; %Кількість поділок для аналізу на лопаті
rho=1.225; %Щільність повітря
dr=D/(2*N); %Відстань між центром елемента кожної поділки (куб.см)
і центром ротора (лопаті + хаб) в'язкість =  $1.47 \cdot 10^{-5}$ 
Tref = 15;
%Прочитали текстовий файл з даними.
%Зв'язок між кутом атаки, кутом керма та кутом опори.
NRELS826='NRELS826';
%Читання Cl та Cd з файлу аеродинамічного профілю
%Два способи читання текстового файлу, набагато краще читати за допомогою feof
airfoil=sprintf('%scoef.txt',NRELS826); fid=fopen(airfoil,'r');
for i=1:102 %Встановлення маркера на правому рядку
line=fgetl(fid);
end
i=1;
frewind(fid);
while ~feof(fid);
tline = fgetl(fid); disp(tline);
end
frewind(fid);
%Ми створюємо вектори, завантажуючи інформацію текстового файлу в % різні вектори для вивчення (кут атаки,
Cl, CD).
%Дані у вигляді горизонтальних векторів
airfoildata=xlsread('AirfoildataAshes',,A10:0102'); ALPHA=transpose(airfoildata(:,1));
CL=transpose(airfoildata(:,2));
CD=transpose(airfoildata(:,3));

%Знаходимо оптимальний кут атаки. alphaopt=ALPHA(CL./CD==max(CL./CD));
Cl0=CL(ALPHA==alphaopt);
Cd0=CD(ALPHA==alphaopt);
%alphaopt=8;
%Cl0=1.3388;
% Cd0=0.0280;
%Ітерація з використанням методу BEM (метод імпульсу елемента лопаті)
Cpmax=0;
Mmax=[]; %Так ініціалізується вектор з "n" позицій.
Lmax=[];
Tmax=[];
Pmax=0;
Mtot=0;
Ttot=0;

```



```

Pmaxtot=[];
Thetamax=[];
T1=nuls(1,N);
M1=nuls(1,N);
%Ініціалізація результуючих змінних на ітерацію
M=0; %Загальний крутний момент
T=0; %Загальна тяга
P=0; %Загальна потужність
Ca=нулі(1,N);
Cr=нулі(1,N);
phi=0;
L=нулі(1,N);
r=0;
r1=нулі(1,N);
PHI=нулі(1,N);
tetha=нулі(1,N);
Vel=нулі(1,N); % Швидкість вітру для кожного аеродинамічного профілю.
Wrel=нулі(1,N); % Відносна швидкість вітру для кожного аеродинамічного профілю.
Reynolds=нулі(1,N); % Число Рейнольдса для кожного аеродинамічного профілю.
%Початковий проект
[x, at, am, phi, Ber]=adisk(TSR); %Ідеальна лопатка phiG = phi.*180./pi; thetaG= phiG - alphaopt;
%Починаємо ітераційний цикл
for i=1:N
    r=r+dr;
    r1(i)=r;
    U=omega*r;
    Vel(i)=U
    %Початковий дизайн очікує виправлення, тобто цей L(i) не буде %правильним! Правильним є той, що
    наведено нижче. L(i)=Ber(i)*((2*pi*V)/(Z*Cl0*omega));
    %початок ітерації a=at(i); a1=am(i); aold=0; a1 old=0;
    Sigma=Z*L(i)/(2*pi*r);
    while ((abs(a-a_old)>=0.000001)||((abs(a1-a1_old)>=0.000001))) a old=a; a1 old=a1;
    phi =atan((1-a)*V/((1+a1)*U));
    Ca=Cl0*cos(phi)+Cd0*sin(phi);
    Cr=Cl0*sin(phi)-Cd0*cos(phi);
    F=2/pi*acos(exp(-(Z*(R-r))/(2*r*sin(phi))));
    якщо ~isreal(F) %F сходиться до 0, потрібно виправити a та a1
    F=0;
    a=1;
    a1=0;
    інакше
    якщо a <0,2 %, то використовуйте поправку Глаурта
    a=A(phi,Ca,F,Sigma);
    інакше
    a=Ac(phi,Ca,F,Sigma);
    кінець
    a1=A1(phi,Cr,F,Sigma);
    кінець
    phi=atan((1-a)*V/((1+a1)*U));
    ber=(4*a*sin(phi))/(1+a1); %Потрібно виправити значення ber L(i)=ber*(2*pi*V)/(Z*Cl0*omega);
    PHI(i)=phi*180/pi; tetha(i)=PHI(i)- alphaopt;
    Wrel(i)=Vel(i)/cos(PHI(i));
    Рейнольдс(i)= (Wrel(i)*L(i))/в'язкість;

```

```

% якщо(L(i)<=0,0275)
%L(i)=0,0275;
% кінець кінець
якщо i==N
dT=0;
dM=0;
L(i)=L(i-1);
інше
dT=Тяга(L(i),phi,F,Ca,a);
dM=Момент(L(i),phi,r,F,Cr,a,a1);
кінець
% якщо L(1)< L(2)
%L(1)=L(2);
% кінець
T1(i)=dT;
M1(i)=dM;
T=T+dT
M=M+dM*r;
dP=dM*омега;
P(i)=dP;
кінець
Рзаг=M*омега;
Cp=Рзаг/(0,5*rho*VA3*pi*RA2); якщо (Cp>Cpmax)
Cpmax=Cp;
Lmax=L;
Mmax=M1;
Tmax=T1;
Pmax=Рзаг;
Рmaxзаг=P;
Мзаг=M;
Тзаг = T;

Тетамакс = тета;

Ct = Ttot / (0,5 * rho * VA2 * pi * RA2);

кінець
fprintf('\n'); % Отримуємо такі результати:
fprintf('Отримані результати такі:\n'); fprintf('\n');

fprintf('alphaopt = %.1f, Cp = %.2f, Ct = %.2f\n', alphaopt, Cpmax, Ct); fprintf('P = %.2f кВт, Крутний момент
= %.2f НМ, Fтяга = %.2f кН \n', Pmax / 1000, Mtot, Ttot / 1000); об/хв = омега * 60 / (2 * pi);

fprintf('n= %.0f об/хв, CL=%.2f, CD=%.2f \n',об/хв,Cl0,Cd0);
%Малюємо графіки та отримуємо результати:
figure(1)
plot(r1,Mmax,r1,Tmax);
title('Крутний момент і тяга в залежності від радіуса'); xlabel('Радіус [м]');
ylabel('Крутний момент [НМ] і тяга [Н]'); legend('Крутний момент','Тяга'); grid on
figure(2);
plot(r1,Lmax);
title('Довжина хорди в залежності від радіуса'); xlabel('Радіус [м]'); ylabel('Довжина хорди [м]');
legend('Довжина хорди'); grid on

```

```
figure(3); plot(r1,Pmaxtot); title('Потужність'); xlabel('Радіус [м]'); ylabel('Потужність'); legend('Вихідна  
потужність') grid on  
figure(4); plot(r1,tetha) title('Кут повороту'); xlabel('Радіус [м]');  
ylabel('Кут повороту'); сітка legend('Кут повороту') увімкнена
```

Додаток Б

```

function [x, a, am, phi, Вер]=adisk(TSR); % (x наприклад, локальний коефіцієнт швидкостей: )
% Для додатних значень x це визначається як: aomin=0,25; aomax=0,3333;
% Коефіцієнт осьової індукції e=20;
% кількість елементів у таблиці;
di=(aomax-aomin)/e;
mi=aomin+di;
ao=mi:di:aomax;
TSR=6,5;
% Геометричні значення з  $x=f(a)$  для  $j=1:e$ 
x1(j)=(4*ao(j)-1)*sqrt((1-ao(j))/(1-3*ao(j)));
% Кінець рівняння (89)
% Обчислення  $a=f(x)$  за допомогою процесу інтерполяції,  $dx=TSR/e$ ;
% Використане збільшення  $x=dx:dx:TSR$ ; ne=довжина(x);
для k=1:ne
a(k)=interp1(x1,ao,x(k),'pchip'); am(k)=(1-3*a(k))/(4*a(k)-1);
% Рівняння (88)  $\phi(k)=\text{atan}((1-a(k))/((1+am(k))*x(k)))$ ;
% Рівняння (105)  $\text{Вер}(k)=(4*a(k)*\sin(\phi(k)))/(1+am(k))$ ;
% Кінець рівняння (104).

```