

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: **РОЗРОБКА ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ**

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

(шифр і назва спеціальності)

Невідомський М.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

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

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

Рецензент Шелестовський Б.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

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)
« » 2024 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 Невідомському Максиму Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка вітроелектричної установки для електропостачання приватного будинку

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

Затверджені наказом ректора від «11» жовтня 2024 року № 4/7-988

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.12.2024

3. Вихідні дані до роботи розробити проект малої вітрової турбіни потужністю не менше 1 кВт

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

1. Сучасні технології вітроенергетики

2. Вихідні дані та принципи проектування

3. Проведення розрахунків

4. Конструкція корпусу турбіни

5. Проектування вежі для кріплення вітротурбіни

6. Специфікація вітроелектричної установки

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

1. Конструкція вітроелектричної установки

2. Зображення спроектованого хабу

3. Схема вітротурбіни із механізмом відхилення при високих швидкостях вітру

4. Схема вітротурбіни із складеним хвостом при високих швидкостях вітру

5. Крива потужності SWT

6. Корпус турбіни. Деталювання

7. Механізм складання хвоста

8. Зображення вітротурбіни

9. Спроектована БЕУ 1кВт SolidWorks

[illegible]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

(підпис)

Невідомський М.В.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 78 сторінок, __ аркушів презентації, 33 ілюстрації, 3 таблиці та 20 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес перетворення поступального руху повітряних мас у механічну та електричну енергію

Предмет дослідження – вітрова турбіна вітроелектричної установки.

Метою кваліфікаційної роботи є: на основі аналізу фізичних принципів використання енергії вітру розробити проект малої вітрової турбіни потужністю не менше 1 кВт.

У роботі розглянуто конструкцію малої вітрової турбіни та розраховано її технічні характеристики відносно вихідних даних. Обрано електрогенератор, розраховано кількість та довжину лопатей, проведено розрахунок хабу, до якого кріпляться лопаті. В результаті розрахунків отримано криву потужності вітроелектричної установки. Також розраховано геометричні розміри корпусу і хвоста турбіни з механізмами відхилення і повороту.

Представлено результати розрахунку вежі висотою 10 м для вітроелектричної установки. Запропоновано та розраховано механізм підйому та опускання вежі. Сформовано специфікацію вітроелектричної установки, яка містить детальний опис усіх її технічних характеристик.

Встановлено кількість електроенергії яка може вироблятися вітроелектричною установкою за рік при різних швидкостях вітру.

Ключові слова: ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА, ШВИДКІСТЬ ВІТРУ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Історія становлення малої вітроенергетики	8
1.2 Сучасні технології вітроенергетики.....	10
1.3 Проблеми вітроенергетики	14
1.4 Висновки до розділу	16
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	17
2.1 Вихідні дані та принципи проектування	17
2.2 Основні принципи роботи ротора	20
2.3 Вітрові ресурси та місце розташування.....	23
2.5 Проведення розрахунків.....	27
2.5.1 Вибір генератора	27
2.5.2 Розрахунок довжини лопатей ротора.....	28
2.5.3 Розрахунок хабу	32
2.5.4 Розрахунок корпусу і хвоста турбіни з механізмами відхилення і повороту	35
2.6 Висновки до розділу	45
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	47
3.1 Конструкція корпусу турбіни	47
3.2 Проектування вежі для кріплення вітротурбіни.....	54
3.3 Електричні системи та системи керування	61
3.4 Специфікація вітроелектричної установки	62
3.5 Висновки до розділу	65
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	67
4.1 Фізичні основи електробезпеки.....	67

4.2 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання	68
4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час	70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75

ВСТУП

Актуальність теми.

Розвиток і комерціалізація технологій сталої енергетики має фундаментальне значення для зусиль, спрямованих на зменшення зміни клімату. Не очікується, що якийсь один вид відновлюваної енергії вирішить проблему глобального потепління і замінить усі викопні види палива. Аналогічно, екологічні, економічні та соціальні наслідки впровадження відновлюваних технологій не вважаються бездоганними або такими, що не мають власних наслідків.

Таким чином, основою для цього дослідження є визнання необхідності сталого використання та розвитку відновлюваних джерел енергії, а також визнання переваг, які такі види енергії можуть мати для окремих осіб та громад, особливо там, де традиційна електроенергія з мережі недоступна.

Впровадження рішень глобальної проблеми на рівні громади чи окремої людини є процесом, що розширює можливості. Підвищення суспільної обізнаності щодо споживання енергії та його наслідків посилить почуття відповідальності кожного за власне енергоспоживання. Малі вітрові турбіни - це один із способів, за допомогою якого окремі особи або громади можуть взяти на себе відповідальність за власне енергоспоживання і таким чином зробити невеликий, але вартісний внесок у глобальні зусилля.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: на основі аналізу фізичних принципів використання енергії вітру розробити проект малої вітрової турбіни потужністю не менше 1 кВт.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розглянути конструкцію малої вітрової турбіни.
2. Вибрати обладнання.
3. Розрахувати технічні характеристики вітрової турбіни.
4. Запропонувати власну конструкцію системи захисту вітрогенератора від великих швидкостей вітру.

5. Розрахувати параметри вежі.
6. Запропонувати та розрахувати механізм підйому та опускання вежі.
7. Сформулювати специфікацію вітроелектричної установки.

Об'єкт дослідження – процес перетворення поступального руху повітряних мас у механічну та електричну енергію.

Предмет дослідження – вітрова турбіна вітроелектричної установки.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток підхід до конструювання системи захисту вітрогенератора від великих швидкостей вітру.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано конструкцію механізму захисту вітрової турбіни від шквальних швидкостей вітру більше ніж 15 м/с шляхом повороту площини її ротора вздовж напрямку вітру.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11–12 груд. 2024 року. ТНТУ [1].

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (20 найменувань) та додатків. Загальний обсяг текстової частини – 78 сторінок, 3 таблиці, 33 рисунки.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Історія становлення малої вітроенергетики

Вітер є однією з форм відновлюваної енергії, яка має потенціал для збільшення національного енергопостачання. Глобальні вітри спричинені різницею тиску на земній поверхні через нерівномірне нагрівання землі сонячним випромінюванням [2,3] та ефектом Коріоліса, що виникає при обертанні Землі. Як форма відновлюваної енергії, вітер є альтернативним джерелом енергії, що стимулюється проблемами антропогенної зміни клімату та обмеженими запасами викопного палива. Урядові стимули також збільшують частку вітрової енергії в національному енергетичному балансі та заохочують розробку вдосконалених вітроенергетичних технологій.

Перші згадки про пристрої, які використовували енергію вітру для виконання роботи, датуються 1 століттям нашої ери на Близькому Сході та в континентальній Азії. Зазвичай це були пристрої з вертикальною віссю, які використовувалися для подрібнення зерна, продуктів харчування та спецій або для осушення рисових полів. На початку 2-го століття н.е. голландці незалежно винайшли інший тип вітряка. Ці вітряки мали схоже призначення з азійськими. Меліорація земель шляхом осушення водойм була особливо важливою в Нідерландах, і саме ця потреба, поряд з іншими загальними цілями, призвела до значного розвитку вітряків. Технологія поширилася по всій Європі, і до середини 19-го століття в Європі налічувалося близько 200 000 вітряків.

Хоча значний прогрес був досягнутий завдяки емпіричним методам, наукові дослідження і розробки також сприяли численним вдосконаленням конструкції вітряків. Такі ключові історичні постаті, як Ньютон, Бернуллі, Ейлер і Кулон, зробили безпосередній внесок у розвиток технологій завдяки вивченню законів фізики, математики і механіки рідини.

Поява і широке використання парового двигуна зробило вітряки дещо зайвими, але, незважаючи на це, розвиток вітроенергетичних технологій продовжувався. Близько 1890 року Ла Кур провів дослідження аеродинаміки

вітрил, і йому приписують всебічний аналіз і опис зачатків технології вітряків, а також генерування електроенергії для створення водню [4]. У 1920 році Альберт Бец сформулював фундаментальні фізичні принципи перетворення енергії вітру, які використовуються і в наш час. У той же період американські винахідники, такі як Халладей і Уілер, розробили унікальні конструкції вітряків, які використовувалися для перекачування води, особливо в сільській місцевості. За даними [4], до 1930 року в США було виготовлено близько 6 мільйонів вітряків. Електрифікація сільської місцевості в середині 20-го століття призвела до різкого занепаду виробництва вітряків, хоча американський вітряк залишається поширеним, а тепер і культовим елементом сільських ландшафтів у багатьох частинах світу (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 - Багатолопатовий вітряк

Щоб залишатися конкурентоспроможною порівняно з більш простими видами енергії, такими як вугілля і нафта, вітроенергетика мала тенденцію до великомасштабного виробництва. Галузь омолодилася після нафтової кризи

1970-х років [4], коли зростання цін на нафту змусило людей шукати альтернативи. Переважна більшість енергії, виробленої сучасними вітрогенераторами, надходить з великих вітроелектростанцій, мегаватних установок і офшорних майданчиків. Величезний прогрес у проектуванні турбін, який полегшився завдяки комп'ютерному проектуванню, вдосконаленню матеріалів і кращому розумінню вітру як ресурсу, забезпечив вітрову енергетику як висококонкурентне джерело енергії для багатьох країн.

Зважаючи на нещодавні екологічні проблеми та зростання цін на викопне паливо, вітрогенератори, ймовірно, відіграватимуть більшу роль у планах багатьох країн щодо виробництва енергії. Розширення вітроенергетичної галузі дозволяє створювати нові ніші, зокрема, ринок малих вітрових турбін. Розробка ВЕУ розпочалася зовсім недавно, але вже є кілька компаній, що виробляють складну продукцію.

1.2 Сучасні технології вітроенергетики

ВЕУ зазвичай класифікуються як такі, що мають вихідну потужність менше 100 кВт. Найменші пристрої генерують близько 50 Вт і часто використовуються в освітніх цілях. Стандарт для проектування МВТ, AS61400:2006, визначає МВТ як такі, що мають площу охоплення менше 200 м². Це відповідає діаметру ротора до 16 м. Подальша класифікація МВТ здійснюється за орієнтацією осі ротора і аеродинамічним принципом, що використовується, тобто підйомною силою або лобовим опором. Було розроблено цілий ряд різних конфігурацій, наприклад, як показано на рис. 1.2.

Орієнтація осі ротора відносно землі зазвичай є горизонтальною або вертикальною. Горизонтально-осьові вітрові турбіни (ГОВТ) є найпоширенішими конструкціями, з дво- або трилопатевию, навітряними конструкціями, які є найбільш відомими. Конструкції Савоніуса і Дар'є домінують серед доступних вертикально-осьових вітрових турбін (ВОВТ). На рис. 1.3 показано приклади кожної з трьох основних конструкцій ВЕУ.



Рисунок 1.2 - Різноманітність конфігурацій вітрових турбін



Рисунок 1.3 - Зображення конфігурацій (а) ГОВТ, (б) Дар'є і (с) Савоніус

Різні конструкції ГОВТ і ВОВТ використовують аеродинамічні принципи лобового опору і підйомної сили. Сили лобового опору і підйомної сили на тіло, занурене у зустрічний потік рідини, - це сили, що діють на тіло в напрямках, паралельних і перпендикулярних потоку, відповідно. Ротори, що використовують аеродинамічний підйом, досягають більш високих коефіцієнтів потужності, ніж пристрої з опором. Коефіцієнт потужності - це відношення механічної потужності, що витягується, до потужності, що міститься в повітряному потоці [4]. Зазвичай, в ГОВТ використовується аеродинамічна підйомна сила, хоча існують й інші конструкції лобового типу. Турбіни Савоніуса є пристроями лобового типу, в той час як конструкція Дар'є використовує підйомну силу.

На рисунку 1.4 [4] показано ідеальний коефіцієнт потужності для поширених конструкцій вітрових турбін.

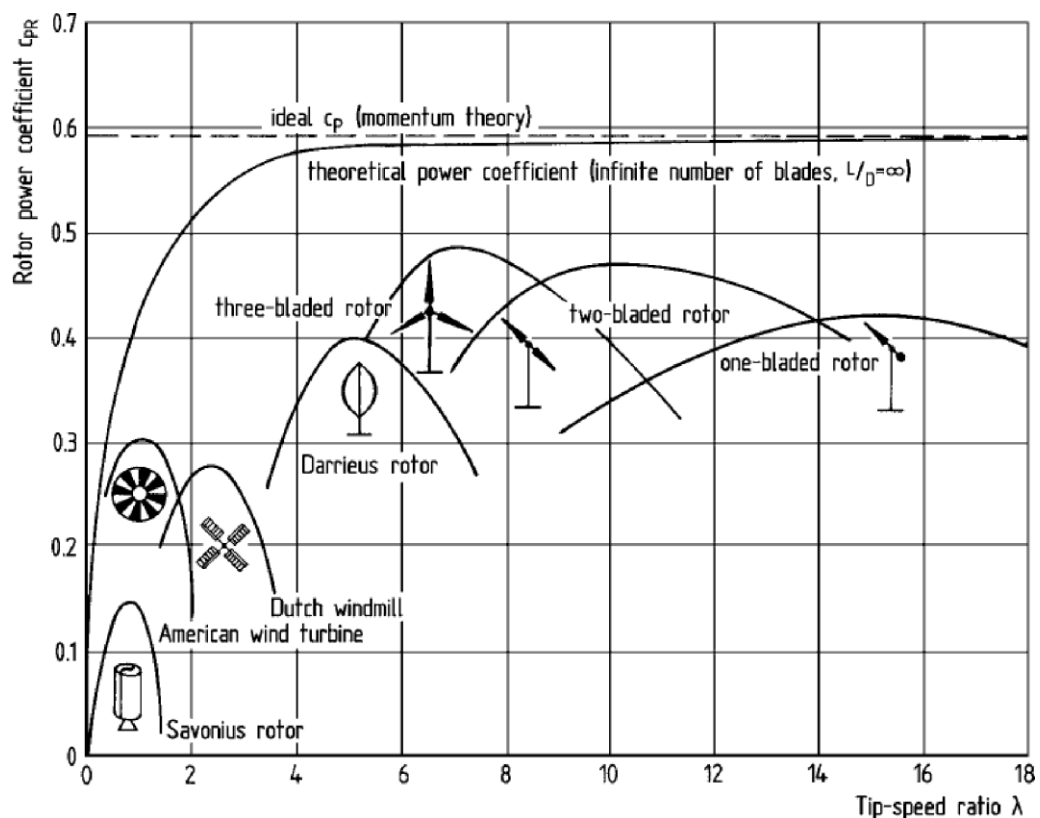


Рисунок 1.4 - Відношення коефіцієнту потужності до швидкості обертання наконечника для різних конфігурацій турбін [4]

З рисунку видно, що ГОВТ є найефективнішими з коефіцієнтом потужності близько 0,49. Турбіни Дар'є досягають максимального коефіцієнта потужності близько 0,4, тоді як конструкції Савоніуса зазвичай досягають лише 0,15. Незважаючи на відмінності в ефективності, кожна конструкція має свої переваги і недоліки. Всі турбіни потрібно розташовувати якомога вище, але ВОВТ дозволяють розміщувати генератор на рівні землі. ВОВТ, як правило, працюють тихіше, ніж ГОВТ, і їм не потрібно обертатися за вітром.

Завдяки їхній вищій ефективності та багатству наявних знань, цей проект буде зосереджений на проектуванні звичайної трилопатевої малої вітрової турбіни з горизонтальною віссю та підйомним типом. Термін «ВЕУ» в цьому документі відноситься до цього типу конструкцій.

Для корисного перетворення енергії вітру ВЕУ потребують наступних основних елементів:

Ротор - для перетворення кінетичної енергії вітру в енергію обертання

Генератор - для перетворення енергії обертання в електричну енергію.

Ротор складається з лопатей і центральної втулки, до якої вони кріпляться. Діаметр ротора, який являє собою коло, описане кінчиком лопаті, є визначальною характеристикою кількості енергії, яку можна отримати від вітру. Генератори використовують принцип електромагнітної індукції для перетворення механічної енергії в електричну.

Окрім основних компонентів, сучасна система ВЕУ складається з наступних компонентів:

Вежа та фундамент - забезпечують стійкість турбіни при високошвидкісному вітрі та піднімають турбіну на таку висоту, де швидкість вітру достатньо висока, щоб генерувати номінальну потужність.

Механізм обертання з хвостовою частиною - повертає ВЕУ за напрямком вітру, щоб ротор працював найбільш ефективно.

Механізм повороту - механічний засіб регулювання потужності, за допомогою якого турбіна відвертається від вітру, що перевищує допустиму межу.

Контактні кільця та електричні кабелі - передають вироблену електроенергію від турбіни, розташованої у верхній частині вежі, до системи зберігання або перетворення енергії, розташованої в основі.

Система зберігання або перетворення енергії - у багатьох випадках для зберігання виробленої електроенергії використовуються акумулятори, а для перетворення виробленої електроенергії у форму, придатну для підключення до електромережі, часто використовується інвертор.

Електрична система управління з захистом від перевантаження та блискавки - електронне управління швидкістю обертання ротора гарантує, що турбіна не зруйнує себе в екстремальних вітрових умовах.

1.3 Проблеми вітроенергетики

Етичний обов'язок інженера - розглянути всі можливі проблеми, пов'язані з будь-яким новим проектом, і вирішити їх відповідним чином. Будь-яка запропонована установка ВЕУ, ймовірно, матиме реакцію з боку місцевої громади. Реакція буде значною мірою передбачуваною, враховуючи велику кількість літератури, присвяченої питанням вітрових турбін. Найпоширеніші з них стосуються соціальних та екологічних наслідків. Зазвичай ці питання пов'язані з великими вітровими турбінами, особливо на вітрових електростанціях, але це не обов'язково означає, що негативні наслідки установки ВЕУ є менш значними. Більше того, це не означає, що занепокоєння громадськості зменшиться. Проведення відповідних технічних досліджень значущості кожного питання, вирішення проблем з метою мінімізації їхнього впливу та надання точної і послідовної інформації громадськості дозволить значно зменшити занепокоєння.

Шумове забруднення є невід'ємною проблемою вітрових турбін, але останніми роками вона стала предметом інтенсивних досліджень, що призвело до загального пом'якшення цієї проблеми. Шум, вироблений турбіною, можна пояснити механічними та аеродинамічними факторами. Простота конструкції -

це характеристика, завдяки якій ВЕУ мають менше механічних частин, а отже, менше механічного шуму, ніж їхні більші аналоги.

Однак, більша швидкість ротора, необхідна для виробництва енергії, означає, що аеродинамічний шум збільшується.

У публікації 2003 року, опублікованій Національною лабораторією відновлюваної енергетики США, порівнюються результати серії випробувань акустичного шуму ВЕУ [5]. Було протестовано вісім різних турбін номінальною потужністю від 400 Вт до 100 кВт. Вимірювання проводилися відповідно до стандартів Міжнародної електротехнічної комісії, які враховують напрямок і швидкість вітру.

З усіх протестованих вітрогенераторів найменший акустичний шум створювала віротурбіна Bergey XL.1, причому видимий рівень звукового тиску неможливо було зафіксувати, оскільки шум турбіни не можна було відокремити від фонового шуму. Southwest Windpower Whisper H40 була єдиною турбіною потужністю менше 10 кВт, яка зафіксувала рівень звукового тиску вище 65 дБ(А) при швидкості вітру 10 м/с.

Естетична цінність ВЕУ є суб'єктивною, а отже, не може бути виміряна. Проектувальники сучасних ВЕУ приділяють значну увагу візуальним характеристикам турбін. Наскільки це можливо, ці конструкції мають бути витонченими та сучасними, з кольоровою гамою, що гармонійно поєднується з природним фоном. Нау [4] підсумовує результати шведського дослідження естетики великих вітрових турбін, яке виділило три фактори, що впливають на візуальний вплив:

Негативні психологічні асоціації, такі як сприйняття небезпеки, які можуть вплинути на враження людини від технології.

Малі вітрові турбіни не виробляють забруднюючих речовин, не викидають парникових газів і не вимагають руйнування середовища для своєї роботи. Вони вважаються «чистим» джерелом енергії [6,11]. Єдиною потенційною екологічною проблемою, яка часто висувається, є небезпека для птахів і кажанів. Будь-яка висока споруда становить небезпеку для птахів і

кажанів, і, зокрема, відомо, що рухомі лопаті спричиняють їхню загибель. Ретельний пошук відповідної літератури не виявив жодних досліджень щодо масштабу цієї проблеми, але веб-сайт Американської вітроенергетичної асоціації применшує її значення. На сайті зазначено, що проблема є більш помітною для великих вітрових турбін, і що безпритульні або бродячі коти є причиною набагато більшої кількості смертей, ніж ВЕУ.

1.4 Висновки до розділу

1. В результаті аналізу літературних джерел обгрунтовано, що енергетичні потреби сучасного суспільства постійно зростають і альтернативні джерела енергії на даний час необхідно розвивати та впроваджувати для задоволення попиту.

2. Проаналізовано відновлювані джерела енергії, а також важливість відновлюваних джерел енергії було представлено в контексті двох основних глобальних проблем, які набувають все більшого усвідомлення та гостроти. Визнаючи проблеми глобальної зміни клімату та обмежених запасів викопного палива, було визначено, що практика сталого розвитку енергетики має вирішальне значення.

3. Встановлено, що вітроенергетика є життєздатним джерелом відновлюваної енергії, здатним задовольнити частину енергетичних потреб України. Було зроблено короткий огляд історії розвитку ВЕУ, а також проаналізовано сучасні технології.

4. В результаті встановлено, що необхідне загальне вдосконалення всіх механічних та електричних компонентів вітроустановок, включаючи спрощення конструкцій для зменшення кількості несправностей та підвищення здатності вітчизняних користувачів самостійно обслуговувати та ремонтувати пристрої.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вихідні дані та принципи проектування

Вирішено, що концептуальний проект базуватиметься на звичайній вітровій турбіні з горизонтальною віссю і трьома лопатями. Основними компонентами такого типу конструкції були визначені:

- Ротор - для перетворення кінетичної енергії вітру в енергію обертання.
- Генератор - для перетворення енергії обертання в електричну енергію.
- Башта і фундамент - забезпечують стійкість турбіни при високошвидкісному вітрі і піднімають турбіну на висоту, де швидкість вітру достатньо висока, щоб генерувати номінальну потужність.
- Механізм обертання з хвостовою частиною - повертає ВЕУ за напрямком вітру, щоб ротор працював найбільш ефективно.
- Механізм повороту - механічний засіб регулювання потужності, за допомогою якого турбіна відвертається від вітру, що перевищує допустиму межу.
- Контактні кільця та електричні кабелі - передають вироблену електроенергію від турбіни, розташованої у верхній частині вежі, до системи зберігання або перетворення енергії, розташованої в основі.
- Система зберігання або перетворення енергії - у багатьох випадках для зберігання виробленої електроенергії використовуються акумулятори, а для перетворення виробленої електроенергії у форму, придатну для підключення до електромережі, часто використовується інвертор.
- Електрична система керування з захистом від перевантаження та блискавки - електронне керування швидкістю обертання ротора гарантує, що турбіна не зруйнує себе в екстремальних вітрових умовах.

До конструкції ВЕУ часто включають й інші компоненти, такі як редуктори, носові конуси, механізми регулювання кроку лопатей і механічні гальмівні системи з електронним управлінням. При розробці концепції

конструкції МВТ значну увагу було приділено простоті, яка необхідна в запропонованому регіональному розташуванні. Враховуючи високі витрати, пов'язані з використанням кваліфікованих сервісних техніків, спрощена конструкція була б вигідною для регіонального розташування. Зменшення кількості компонентів у системі зменшує ймовірність помилок або збоїв, а також полегшує обслуговування пристрою власником або місцевими технічними спеціалістами.

На основі вищезазначеного обговорення було створено схему, яка висвітлює ключові особливості запропонованої концепції (див. рисунок 2.1).

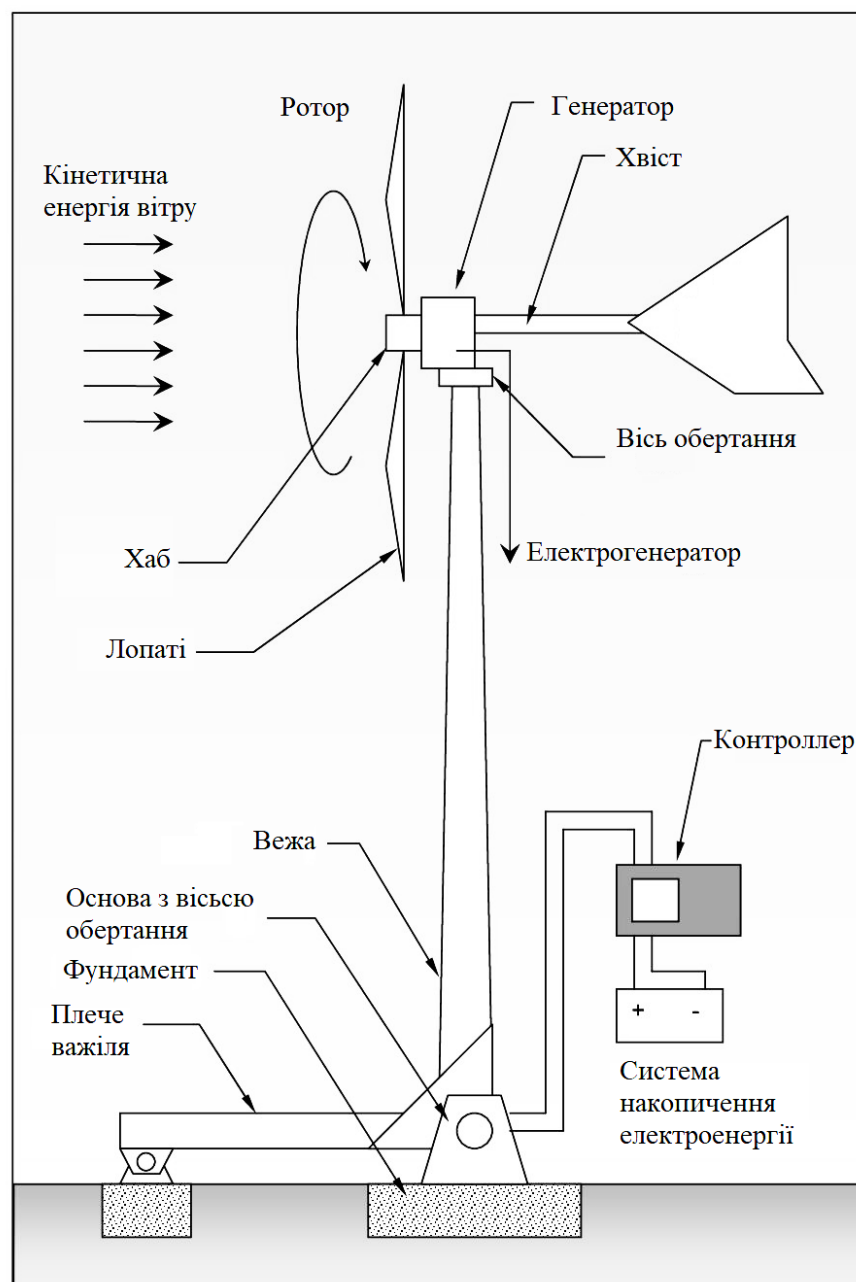


Рисунок 2.1 – Конструкція вітроелектричної установки

Основний метод роботи та основні компоненти концептуального дизайну є наступними:

1. Кінетична енергія вітру вловлюється ротором, що змушує його обертатися. Ротор складатиметься з набору трьох лопатей, з'єднаних з центральною втулкою.

2. Втулка ротора, яка безпосередньо прикріплена до валу генератора, забезпечує обертальний рух генератору. Генератор перетворює кінетичну енергію в електричну.

3. Вихідні кабелі від генератора підключаються до контактних кілець. Це необхідно для того, щоб турбіна могла відхилятися за напрямком вітру за допомогою хвостової частини. Електричні кабелі проходять по внутрішній частині вежі до основи.

4. Механічний засіб згортання необхідний для того, щоб дозволити турбіні розвертатися проти вітру, регулюючи таким чином її потужність і запобігаючи пошкодженню від високої швидкості.

5. Вежа підніматиме турбіну і слугуватиме кожухом для електричних кабелів, які виходять з основи.

6. Основа вежі буде поворотною, що дозволить легко піднімати та опускати турбіну для встановлення та обслуговування. Плече важеля можна переміщати за допомогою лебідки.

7. Фундаменти слугуватимуть основою та точкою кріплення для опори.

8. Буде передбачено контролер для регулювання струму через батареї, щоб запобігти пошкодженню та підтримувати безпечну напругу.

9. Акумуляторна батарея використовується для зберігання вловленої енергії, щоб її можна було транспортувати або використовувати пізніше.

На додаток до наведеного вище опису концептуального проекту, при розробці остаточного проекту необхідно також врахувати наступні моменти:

- електробезпека та блискавкозахист;

- забезпечення виробництва, транспортування, монтажу, експлуатації, технічного обслуговування та виведення з експлуатації;
- захист від корозії.

2.2 Основні принципи роботи ротора

Основна функція ротора вітрової турбіни полягає в тому, щоб використовувати кінетичну енергію, наявну в рухомому потоці повітря, для створення обертального руху валу. Перед будь-яким подальшим проектуванням компонентів необхідно зрозуміти основні принципи роботи ротора в стаціонарному режимі. Обертання диска в потоці повітря, що рухається, регулюється набором основних правил. Ідеалізований або досконалий ротор в умовах стаціонарного режиму, звичайно, є спрощенням реальної системи, але, тим не менш, є фундаментальним для розуміння виробництва електроенергії вітрогенератором. Базові концепції слугують для ілюстрації загальної поведінки роторів вітрових турбін і повітряних потоків навколо них. Вони також дозволяють розрахувати теоретичні робочі характеристики.

Окрім базових механізмів, практичне проектування ротора вимагає розуміння аеродинаміки лопатей ротора. Лопаті зазвичай мають форму аеродинамічних крил, які мають спеціальну форму для максимізації аеродинамічної підйомної сили при мінімізації лобового опору. Сучасні ГОВТ використовують одну, дві або три лопаті ротора, кожна з яких має свої переваги і недоліки. Конструкція лопаті має вирішальне значення для пуску і роботи турбіни, не тільки з точки зору відбору потужності, але і з точки зору структурної цілісності та втомної витривалості ротора.

Однією з основних теорій аеродинаміки ротора є одновимірна (1D) теорія елементарних моментів Беца. Більш складні теорії, такі як двовимірна (2D) теорія елементів лопаті або теорія вихорів, можуть забезпечити більш точне визначення характеристик ротора, але для цілей цього проекту, ймовірно, є

надмірними [4]. Проста теорія імпульсу Беца розглядає потік повітря, що рухається через круглий диск. Аналіз базується на наступних припущеннях:

- однорідний, нестисливий, стаціонарний потік рідини;
- відсутність опору тертя;
- нескінченна кількість лопатей;
- рівномірна тяга по всій площі ротора;
- необертальний слід (потік повітря після проходження через ротор);
- статичний тиск на вході і виході дорівнює незбуреному статичному тиску навколишнього середовища.

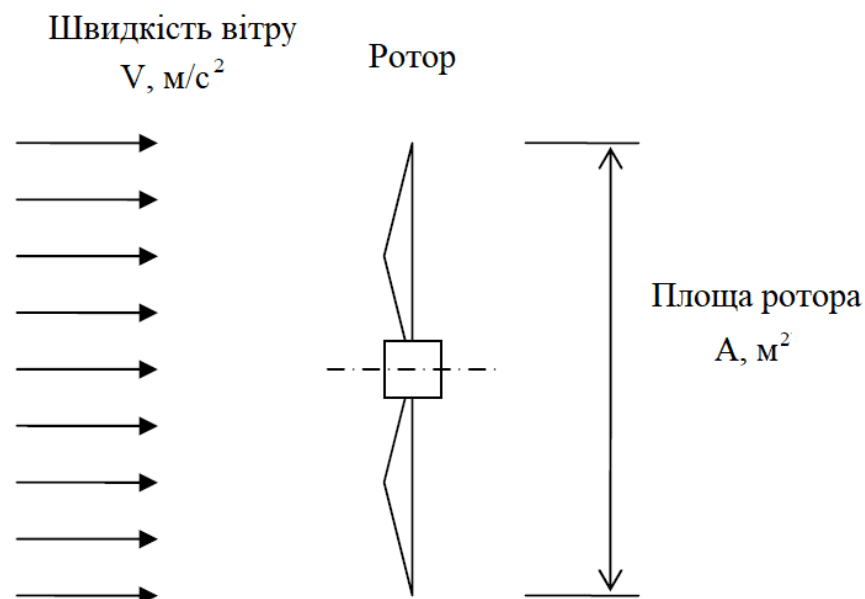


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема

Одновимірна теорія розглядає рухомий потік повітря, що проходить через круглий диск (рис. 2.2). Енергія в рухомому потоці повітря описується рівнянням кінетичної енергії:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_{wind}^2,$$

де E_k - кінетична енергія повітряного потоку (Дж);

m - маса повітря (кг);

v_{wind} - швидкість повітря (м/с).

Потужність у цьому потоці повітря задається енергією за одиницю часу:

$$P = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \frac{mv_{wind}^2}{t} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} v_{wind}^2 = \frac{1}{2} \dot{m} v_{wind}^2$$

де $\dot{m}$ - масова витрата повітряного потоку, і визначається за формулою,

$$\dot{m} = \rho A_{rotor} v_{wind}$$

Таким чином, потужність рухомого потоку повітря з густиною ρ і швидкістю v , що протікає через диск площею A , дорівнює

$$P = \frac{1}{2} \rho A_{rotor} v_{wind}^3$$

Цей вираз дає потужність, доступну в рухомому потоці повітря, але потрібна потужність, яку можна витягти з цього рухомого потоку. Таким чином, ми можемо розглянути співвідношення, відоме як коефіцієнт потужності, між потужністю вітру і потужністю ротора:

$$C_p = \frac{\text{Потужність ротора}}{\text{Потужність вітру}}$$

Теоретично, максимально можливий коефіцієнт потужності ротора визначається межею Беца, $C_p = 16/27 = 0,593$ [12]. На практиці, однак, подальша неефективність призводить до зниження максимально досяжної вихідної потужності:

- обертання сліду після того, як вітер пройшов через ротор;
- кількість використовуваних лопатей і втрати на кінчиках лопатей;
- ненульовий аеродинамічний опір, як передбачається 1D теорією;
- електричні втрати, такі як втрати тепла через кабелі передачі або неефективність контактних кілець.

Таким чином, вихідна потужність МВТ може бути підсумована наступним чином:

$$P = C_p \eta \frac{1}{2} \rho A_{rotor} v_{wind}^3 (Bm) \quad (2.1)$$

де C_p - коефіцієнт потужності лопатей;

η - коефіцієнт корисної дії турбіни з урахуванням всіх механічних та електричних втрат.

Для досягнення проектної потужності 1 кВт необхідно визначити коефіцієнт потужності ротора, оцінити загальний ККД турбіни, оцінити щільність повітря і швидкість вітру в заданому місці, а також визначити діаметр ротора. У розділах 2.3 і 2.4 буде розглянуто цільове розташування і визначено необхідні параметри вітру. У розділі 2.5 буде детально розглянуто конструкцію турбіни МВТ і визначено технічні характеристики пристрою.

2.3 Вітрові ресурси та місце розташування

Найкращим місцем для розміщення ВЕУ буде те, де вітрового ресурсу достатньо для ефективного виробництва 1 кВт електроенергії, і де місцева громада може отримати вигоду від установки, наприклад, у віддаленому від електромережі регіоні.

Даний вітрогенератор буде використано для живлення приватного будинку у с. Петриків Тернопільського району. Дані щодо швидкостей вітру для даного населеного пункту взято з сайту WeatherSpark.com і наведено на рис. 2.3.

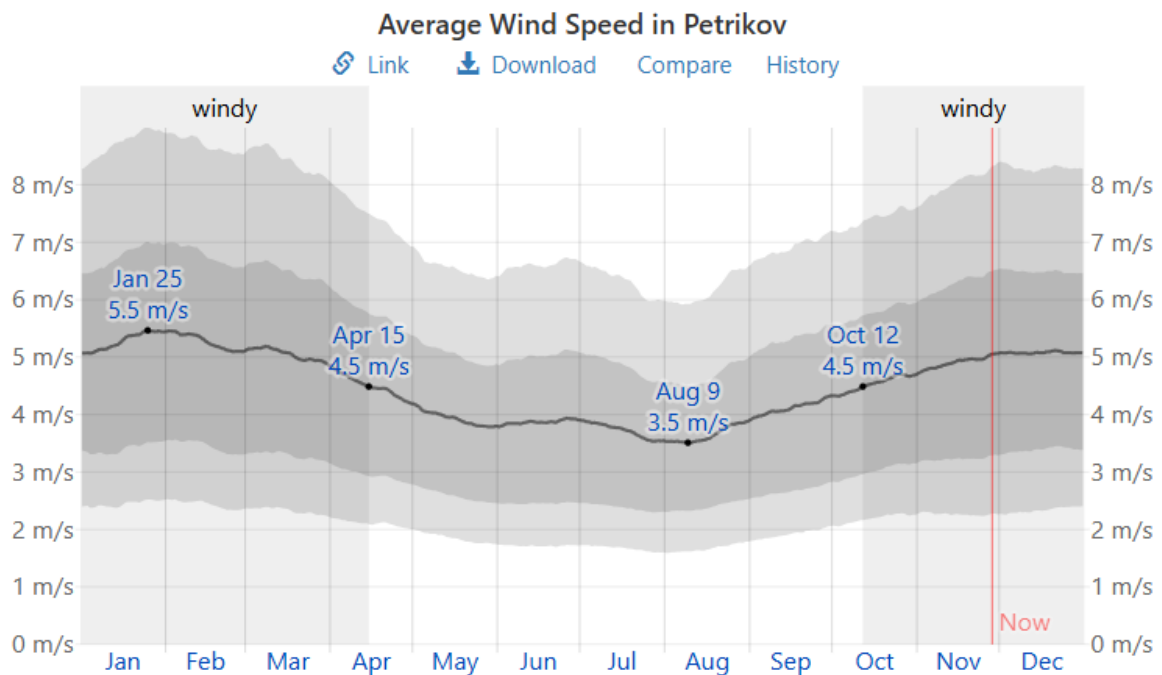


Рисунок 2.3 - Середнє значення середньогодинної швидкості вітру (темно-сіра лінія) у с. Петриків

Середня погодинна швидкість вітру в Петрикові зазнає значних сезонних коливань протягом року. Найбільш вітряна частина року триває 6.1 місяців, з 12 жовтня по 15 квітня, із середньою швидкістю вітру більше 4.5 метрів за секунду. Найвітряніший місяць року в Петрикові - січень, середня погодинна швидкість вітру становить 5,3 метра на секунду.

Переважаючий середньогодинний напрямок вітру в Петрикові змінюється протягом року.

Найчастіше вітер дме з півдня впродовж 1,1 місяця, з 9 квітня по 11 травня, і впродовж 2,9 тижня, з 26 жовтня по 15 листопада, з максимальною часткою 37% 11 листопада. Найчастіше вітер дме з півночі протягом 3,1 місяця, з 11 травня по 15 серпня, з максимальним відсотком 35% 9 липня. Вітер найчастіше дме із заходу протягом 2,4 місяців, з 15 серпня по 26 жовтня, і протягом 4,8 місяців, з 15 листопада по 9 квітня, з максимальним відсотком 36% 23 жовтня.

Подальше дослідження вітру як ресурсу підкреслило переваги місцевих топографічних особливостей для малої вітроенергетики особливо в зимку. Було визначено, що такі особливості, як невеликі пагорби, можуть підвищити якість наявного вітрового ресурсу. Даний вітрогенератор буде змонтовано на пагорбі де швидкість вітру на 30-50% вища за середню.

Для оцінки потенціалу запропонованого майданчика необхідно розуміти варіації доступності та швидкості вітру.

Вітер - це рух повітряних мас в атмосфері, який спричиняється кількома факторами. Найбільший внесок у формування глобальних вітрових режимів робить сонце, оскільки нагрівання і охолодження в атмосфері призводять до коливань щільності і тиску, які, в свою чергу, створюють рух, коли тепліше, менш щільне повітря піднімається вгору і змінюється більш холодним, більш щільним повітрям. Сонячна енергія змінюється з часом як у добовому, так і в річному циклах, а також залежно від географічних факторів. Нерівномірне

поглинання і відбиття тепла спричиняє відмінності в температурі, густині і тиску атмосфери [4].

Сили Коріоліса мають великий вплив на переважаючі вітрові потоки по всій земній кулі. Основний процес полягає в тому, що коли сонячна енергія нагріває повітря на екваторі, змушуючи його підніматися і рухатися до полюсів, обертання Землі змушує це повітря відхилятися від полюсів назад у напрямку екватора, створюючи таким чином великі кругові системи [12].

Ближче до поверхні Землі, в «прикордонному шарі», сила геострофічних вітрів, шорсткість поверхні, ефекти Коріоліса і теплові ефекти роблять найбільший внесок у формування місцевих вітрових потоків. У кожному конкретному місці ми можемо скористатися цими ефектами. Через малу висоту хабу, на відбір потужності ВЕУ значною мірою впливають топографічні фактори. Поверхневе тертя зменшує швидкість вітру, тому вежі потрібно будувати на такій висоті, щоб максимізувати видобуту потужність при мінімізації початкових витрат на одиницю продукції. Прикладом топографічного впливу є прибережні райони, де швидкість вітру, як правило, вища, ніж у внутрішніх районах, через різницю тиску між повітрям над сушею і морем.

Оскільки вони короткі і малі, на продуктивність ВЕУ значною мірою впливає місцевий рельєф, зокрема, дерева і будівлі. В ідеалі турбіну слід встановлювати на рівній, піднесеній і вільній від перешкод місцевості. Однак для ВЕУ не менш важливо виробляти електроенергію поблизу точки споживання, щоб зменшити втрати від кабелів електропередач.

У прикордонному шарі швидкість вітру зростає з висотою відповідно до наступного рівняння [4]:

$$v_H = v_{wind} \left(\frac{H}{H_{hub}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

де v_H - швидкість вітру на висоті, H (м/с);

H - висота над рівнем землі (м);

H_{hub} - висота хабу турбіни над рівнем землі (м);

a - показник Хелмана.

Нау [4] стверджує, що показник Хеллмана можна апроксимувати наступною формулою:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \frac{H}{z_0}}$$

Значення z_0 - це довжина шорсткості рельєфу в метрах. Довжина шорсткості - це параметр, який визначається типом нерівностей поверхні, таких як дерева або будівлі. Там, де немає перешкод, наприклад, на рівнинній місцевості або над водою, довжина шорсткості може становити лише міліметр. Але в щільній міській або лісовій місцевості довжина нерівностей може досягати метра. Згідно з наведеними рівняннями, зі збільшенням висоти над рівнем землі, H , і зменшенням довжини шорсткості, z_0 , швидкість вітру, v_H , зростає.

2.5 Проведення розрахунків

У цьому розділі буде детально розглянуто конструкцію турбіни МВТ та визначено технічні характеристики пристрою. Кожен з необхідних компонентів буде систематично досліджений і сформульоване оптимальне рішення. Цей етап методології слідує за вибором цільового місця розташування і завершує загальний дизайн системи.

Вибір генератора і лопатей ротора передувє вибору інших елементів МВТ, тому буде дотримуватися наступний порядок проектування:

1. Генератор
2. Лопаті ротора
3. Втулка
4. Корпус і хвіст турбіни, з механізмами обертання і згортання

Кінцевим результатом проектування буде набір компонентів, інтегрованих у працездатну систему. На основі окремих проектних деталей буде визначено набір технічних характеристик.

2.5.1 Вибір генератора

Генератор є основним елементом ВЕУ. Обертальний рух, що створюється ротором, перетворюється генератором в електричний струм. Генератор - це широкий термін, який описує електричну машину, що перетворює механічну енергію в електричну, але існує кілька різних типів генераторів.

В результаті дослідження комерційно доступних ПМГ ми рекомендуємо використовувати Ginlong GL-PMG-1000 [13] для цього проекту MBT. Ginlong PMG має 3-фазний вихід змінного струму і здатний генерувати необхідний 1 кВт при приблизно 440 об/хв. Корпус генератора виготовлений з алюмінію і пофарбований для захисту від окислення і корозії. На рисунку 2.4 показано вигляд спереду і ззаду блоку PMG, а на рисунках 2.5 і 2.6 показано вихідну потужність і напругу в залежності від швидкості обертання.



Рисунок 2.4 - Вигляд Ginlong GL-PMG-1000 [13]

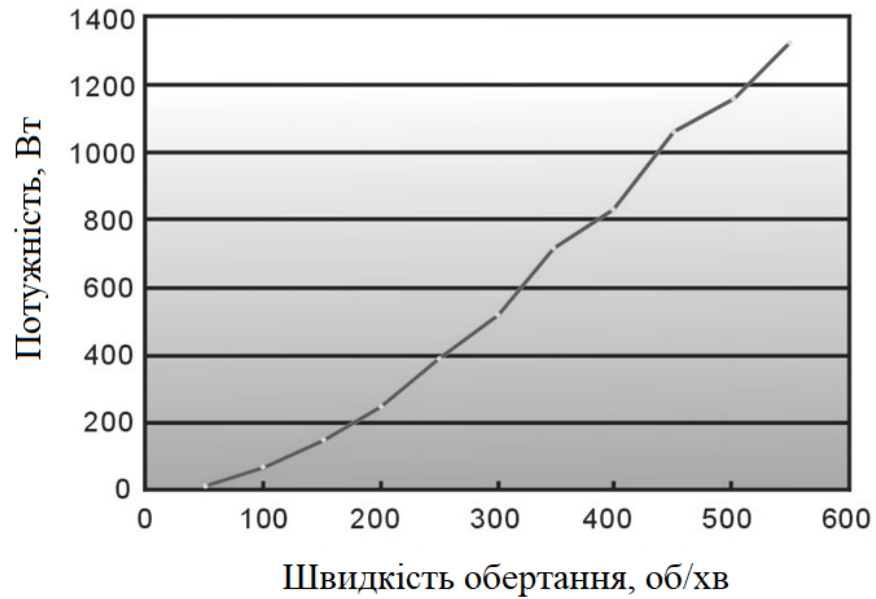


Рисунок 2.5 - Крива потужності GL-PMG-1000 [13]

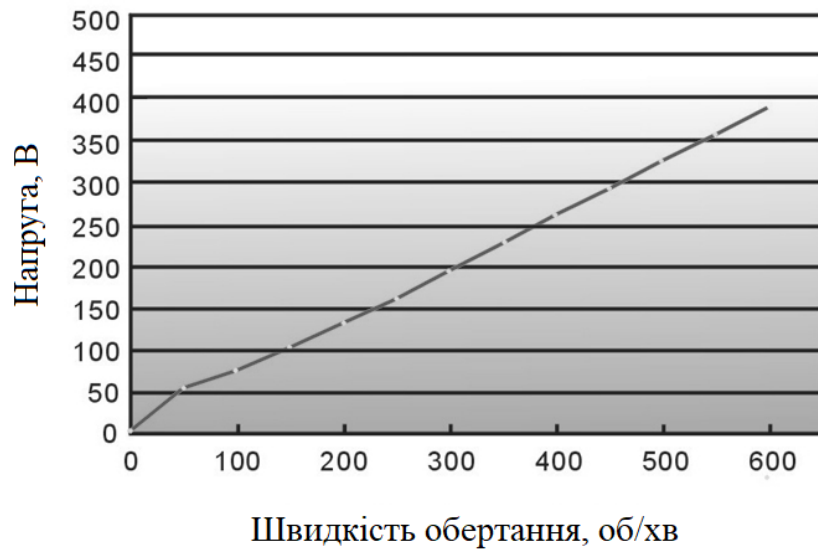


Рисунок 2.6 - Напруга холостого ходу GL-PMG-1000 [13]

2.5.2 Розрахунок довжини лопатей ротора

Лопаті ротора, що працюють як комплект, є фундаментальним елементом турбіни. Їх єдиною функцією є перетворення сили вітру в крутний момент. При проектуванні лопатей враховуються два основних фактори: аеродинаміка і структурна цілісність. Типові навантаження, яких зазнають лопаті, можуть бути постійними і змінними, оскільки вітер постійно змінюється. Таким чином, втомлюваність є критично важливим елементом, який необхідно враховувати

при проектуванні лопаті. Важливо мінімізувати вагу лопаті, тому часто обирають волокнисті композити. Це, в свою чергу, збільшує витрати, включаючи витрати на виробництво.

У процесі проектування лопатей ротора враховувалися очікувані навантаження і, як наслідок, високі вимоги до міцності конструкції і втомної міцності. Також було визнано, що мінімальна вага лопаті має перевагу в зниженні швидкості запуску турбіни при одночасному зменшенні інерційних сил. Були розглянуті різні матеріали, а також питання технічного обслуговування і надійності.

Зараз є достатньо даних, щоб розпочати доопрацювання концептуального проекту. Коефіцієнт потужності, співвідношення швидкостей на кінчику і діаметр є функціями геометрії і аеродинамічних характеристик лопаті. Щоб оцінити необхідний діаметр лопаті, ми можемо вгадати коефіцієнт потужності і використати його в рівнянні потужності. Знаючи межу Беца 0,593 і реально сподіваючись на коефіцієнт потужності більше 0,2, перше припущення щодо коефіцієнта потужності буде зроблено на половині шляху, тобто $C_p = 0,4$. Загальний коефіцієнт корисної дії буде прийнято рівним 90%, а щільність повітря і розрахункова швидкість вітру були наведені в розділі 2.4 як $1,2 \text{ кг/м}^3$ і 10 м/с відповідно. Як описано в розділі 2.2, вихідна потужність ВЕУ визначається рівнянням (2.1).

Рівняння (2.1) можна переставити для площі ротора:

$$A_{\text{rotor}} = \frac{P}{\frac{1}{2} C_p \eta \rho v_{\text{wind}}^3}$$

Тепер підставляємо відомі значення:

$$A_{\text{rotor}} = \frac{1000}{\frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 10^3} = 4,63$$

Це приблизна площа ротора, необхідна для виробництва 1 кВт потужності. Отже, радіус ротора, або довжина лопаті, визначається за формулою:

$$r = \sqrt{\frac{A_{\text{rotor}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4,63}{\pi}} = 1,2$$

Згодом було проведено пошук лопатей MBT, які б відповідали цим приблизним характеристикам. У таблиці 2.1 узагальнено отримані дані. Інформація була надана компаніями Applied Magnets, CMS Magnetics Co., Qingdao Zhongchen FRP Engineering Co. Ltd. та Jiaxing Anhua Wind Power Generator Co. Ltd. Не було знайдено жодного виробника алюмінієвих або дерев'яних лопатей, які б відповідали вимогам проекту щодо потужності. Було оцінено чотирьох виробників лопатей, які постачають лопаті зі склопластику.

Таблиця 2.1 - Порівняння комерційно доступних лопатей

Виробник	Прикладні магніти	CMS Magnetics	Qingdao Zongchen FRP Engineering	Вітрогенератор Jiaxing Anhua
Модель	Windmax 8.5FT	PowerMax + 085	-	-
Походження	США	Китай	Китай	Китай
Технічні характеристики				
Діаметр ротора (м)	2,60	2,60	2,50	2,50
Площа захвату ротора (м ²)	5,31	5,31	4,91	4,91
Матеріал	GFRP	GFR	GFRP	GFR
Коефіцієнт потужності ротора	0,49	0,49	0,2	0,4
Коефіцієнт швидкості наконечника	8	8	6,54	6,54
Маса леза (кг)	1,82	1,95	4,00	2,30
Збалансований	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК
Вартість				
Загальна вартість - 1 комплект	\$423,32	\$408,88	\$2,628,08	\$478,34
Загальна вартість - 100 комплектів	\$398,24	\$408,88	\$405,73	\$464,71

Інформація від постачальників лопатей тепер може бути використана для переоцінки конструкції з точки зору потужності. З найменшою вагою і вартістю, а також найвищим коефіцієнтом потужності, лопаті Applied Magnets Windmax 8.5FT виявилися найкращим варіантом. Для визначення потужності, яку можна отримати, необхідно перевірити технічні характеристики. Реальні значення тепер можна підставити в рівняння 2.1:

$$P = 0,49 \cdot 0,9 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 5,31 \cdot 10^3 = 1405$$

Це представляє потужність, яку можна отримати при розрахунковій швидкості вітру 10 м/с, і є більшою за необхідний 1 кВт. Електрична потужність, яка може бути отримана при цьому, визначається швидкістю обертання генератора. Вже відомо, що кутова швидкість приблизно 440 об/хв, або близько 46,1 рад/с, необхідна генератору для виробництва 1 кВт електроенергії. Отже, враховуючи коефіцієнт швидкості наконечника 8, ми повинні знати, чи буде ротор обертатися з необхідною швидкістю.

$$\begin{aligned} v_{tip} &= v_{wind} \lambda \\ \omega &= \frac{v_{tip}}{r} = \frac{v_{wind} \lambda}{r} \\ \omega &= \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{v_{wind} \lambda}{r} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{10 \cdot 8}{1,3} = 588 \end{aligned}$$

Лопаті здатні забезпечити кутову швидкість, необхідну для задоволення вимог генератора, і вважаються адекватними для свого призначення. На рисунку 2.7 показано зображення вибраних лопатей.

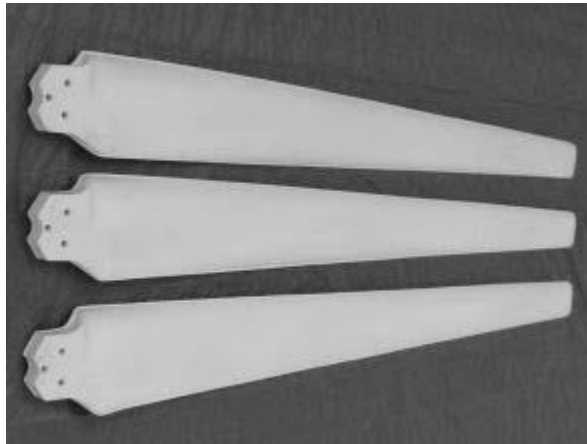


Рисунок 2.7 - Обрана лопать ротора

2.5.3 Розрахунок хабу

Хаб забезпечує точку з'єднання для набору лопатей, так що ротор може бути сформований. Вона кріпиться до валу генератора, щоб обертання лопатей могло передаватися генератору.

Нами розроблена тривимірна модель хабу у SolidWorks, яка передбачала кріплення до конічного валу генератора, що фіксується стандартною шпонкою. Отвори для кріплення лопатей ротора були передбачені відповідно до специфікації виробника.

Для вибору відповідного матеріалу необхідно виконати скінченно-елементний аналіз моделі хабу. Інерційні сили, спричинені кутовою швидкістю ротора, визначаються за формулою:

$$F_{inertia} = r_G \omega^2 m_{blade}$$

де r_G - відстань від осі до центру ваги (м);

ω - кутова швидкість ротора (рад/с);

m_{blade} - маса окремої лопаті ротора (кг).

Виробник лопаті вказує масу лопаті 1,82 кг, при цьому COG розташований на відстані 620 мм від осі ротора. Кутова швидкість ротора є функцією швидкості вітру, але обмежена системою скручування, яка буде

описана в розділі 2.5.4. Щоб знайти максимальну інерційну силу кожної лопаті, потрібна максимальна швидкість ротора, і подальші розрахунки показують, що вона становить 90 рад/с. Таким чином, сила інерції кожної лопаті дорівнює

$$F_{inertia} = 0,62 \cdot 90^2 \cdot 1,82 \approx 9140 N$$

Ця сила рівномірно розподіляється на кожен з трьох отворів для болтів і є однаковою для кожної лопаті. Дія цих сил на статичний хаб показана на рисунку 2.8. Сили реакції на хаб позначені через R_x і R_y .

Цей випадок навантаження був проаналізований за допомогою статичного програмного забезпечення Cosmos, і максимальне напруження для цього випадку навантаження було знайдено в центрі отворів для болтів, з величиною 33,2 МПа, як показано на рисунку 2.9.

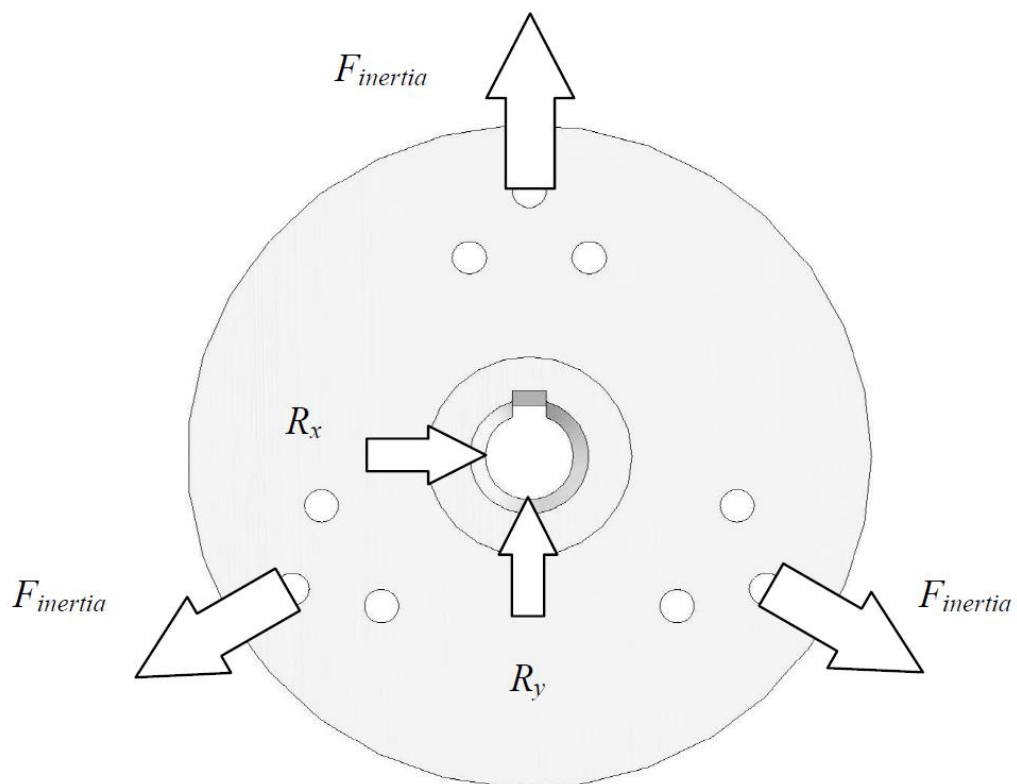


Рисунок 2.8 - Навантаження на хаб

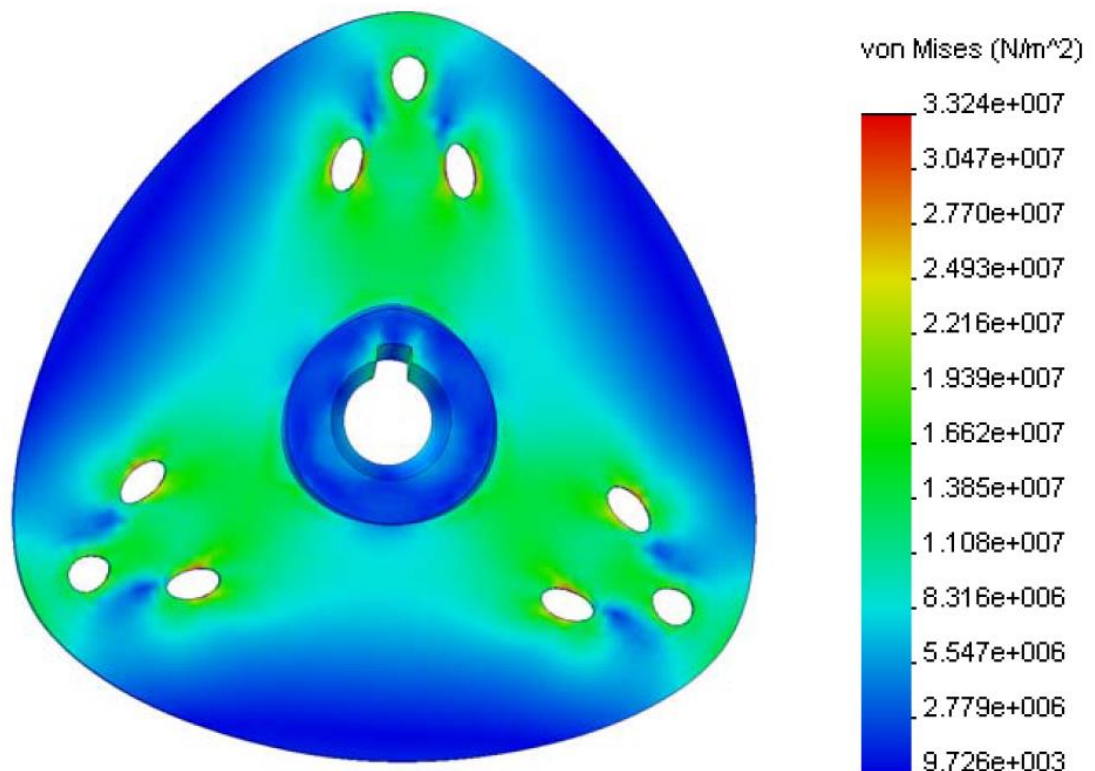


Рисунок 2.9 - Зображення спроектованого хабу

Деякі автори визначають основні марки сталі та алюмінію як такі, що мають межу текучості 290 МПа та 60 МПа відповідно. Напруження, викликане інерційними навантаженнями, є меншим за межу плинності обох матеріалів. Коефіцієнт запасу міцності (КЗМ) для кожного матеріалу становить 8,7 для сталі та 1,8 для алюмінію. У випадку екстремальних навантажень, що виходять за рамки цього аналізу, КЗМ алюмінієвого хабу, ймовірно, буде занадто низьким. Коефіцієнт запасу міцності 3 є основним номінальним стандартом для більшості інженерних конструкцій і буде прийнятий тут, оскільки розглядалась лише одна умова навантаження. Таким чином, хаб буде виготовлений з м'якої сталі. Детальне креслення хабу можна знайти в розділі 3.

2.5.4 Розрахунок корпусу і хвоста турбіни з механізмами відхилення і повороту

Корпус турбіни займає центральне місце в конструкції ВЕУ. Корпус забезпечує точку кріплення для генератора і кріпиться до верхньої частини вежі. Невід'ємною частиною цієї конструкції є механізми повороту і згортання. Поворот (рискання) - це процес розвороту ротора назустріч вітру, тобто вирівнювання осі ротора за напрямком вітру. Оскільки вітер є джерелом енергії, що постійно змінює свою інтенсивність і напрямок, поворот (рискання)- це процес, який повинен відбуватися майже миттєво, щоб найкращим чином захопити доступну енергію. Механізмом, що використовується для повороту, є хвіст. Баланс вітрових сил на хвості гарантує, що при зміні вітру турбіна автоматично і миттєво коригує свій напрямок. Тому в конструкції корпусу турбіни необхідно передбачити підшипник повороту. Крім того, необхідний набір контактних кілець, щоб запобігти скручуванню електричних кабелів від генератора вниз по внутрішній частині вежі.

Постійні коливання сили вітру, і особливо екстремальні швидкості вітру, що виникають під час циклонів, повинні бути враховані в конструкції турбіни. Регулювання потужності ротора за допомогою діапазону швидкостей вітру відоме як фальцювання, і простий механізм, розроблений для досягнення цього, використовує переваги збільшення швидкості вітру для розвороту ротора від напрямку вітру. Механізм повороту змінює баланс моментів відносно осі повороту, щоб змінити напрямок осі ротора і запобігти захопленню турбіною надмірно високих швидкостей вітру, які загрожують перевантаженням механічних і електричних компонентів. Коли швидкість вітру зменшується, механізм згортання повинен автоматично повертати систему в нормальний робочий стан, щоб забезпечити нормальну роботу.

Геометрія турбіни в першу чергу визначається вимогами до монтажу генератора і контактних кілець. Потім будуть спроектовані механізми повороту

і згортання, які остаточно визначають розділі 3. Концепція механізмів повороту та повороту показана на рисунку 2.10.

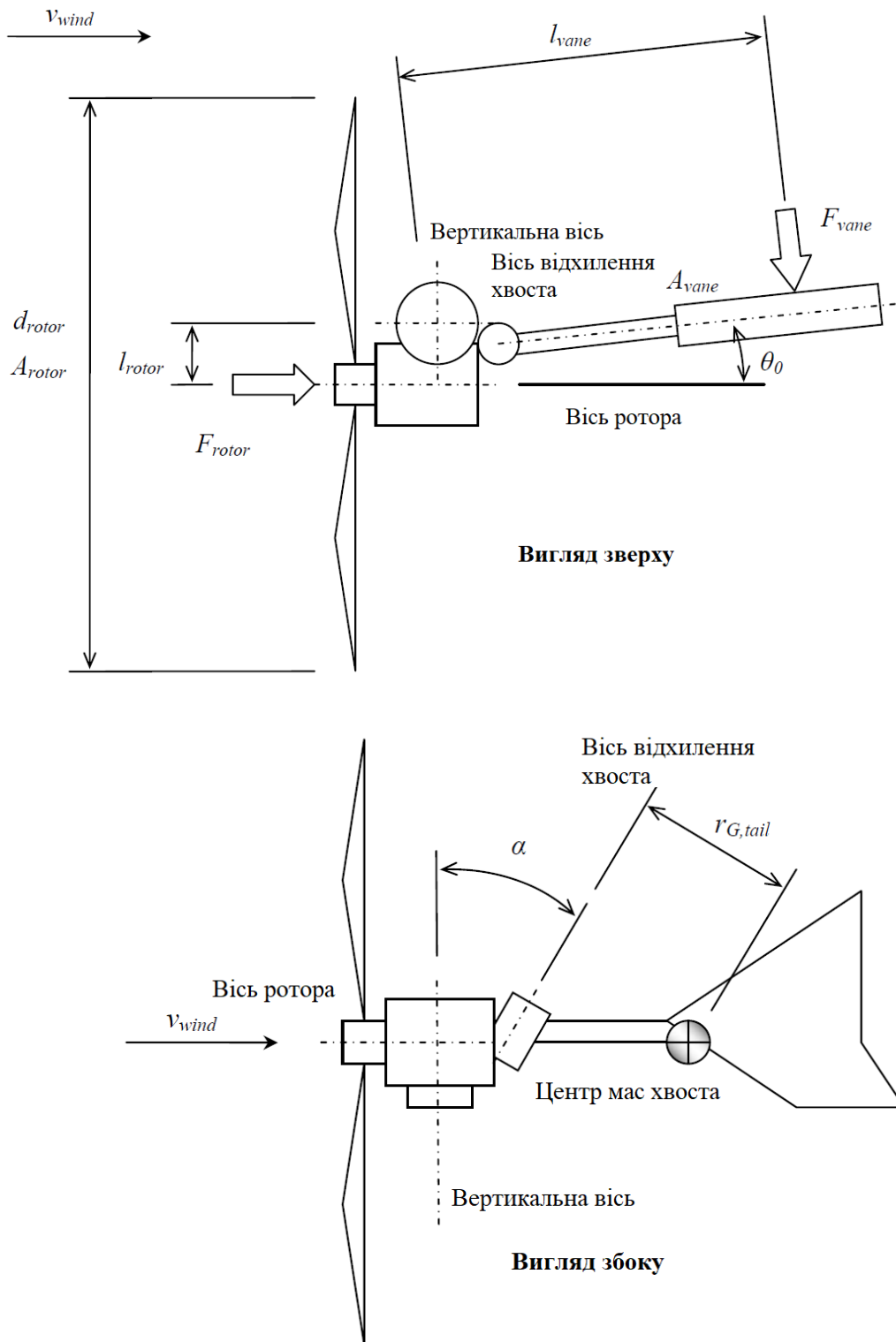


Рисунок 2.10 – Схема вітротурбіни із механізмом відхилення при високих швидкостях вітру

Вісь повороту зміщена від осі ротора таким чином, що сила тяги ротора створює обертаючий момент. Ця сила врівноважується силою вітру на хвостовому гвинті, який зміщений на кут θ_0 від напрямку вітру. У нормальному режимі роботи сила тяги і сила на хвостовому гвинті залишаються збалансованими таким чином, що вісь ротора залишається паралельною напрямку вітру. Хвостова частина повернута навколо похилої осі під кутом α так, що вага хвостової частини примушує її повернутися в нормальне положення під кутом θ_0 . Зі збільшенням швидкості вітру сила, що діє на хвіст, долає вагу хвоста, змінюючи кут нахилу хвоста. Це змінює баланс сил обертання, змушуючи турбіну обертатися так, що вісь ротора перестає бути паралельною напрямку вітру. На рисунку 2.11 показано БЕУ у згорнутому положенні.

Сума сил навколо осі повороту (О) визначається за формулою:

$$\sum M_o = 0 = F_{rotor} l_{rotor} - F_{vane} l_{vane} \quad (2.3)$$

де F_{rotor} - сила тяги ротора (Н);

l_{rotor} - відстань зміщення ротора (м);

F_{vane} - сила вітру, що діє по нормалі до хвостового флюгера (Н);

l_{vane} - відстань від осі повороту до центру площі хвостового гвинта (м).

Силу вітру на будь-яку задану площу можна знайти за формулою:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{m}{dt} dv = \dot{m}v = \rho A v_{wind}^2$$

Так само для ротора:

$$F_{rotor} = \rho A_{rotor} v_{wind}^2$$

І для хвостового флюгера:

$$F_{vane} = \rho A_{vane} v_{wind}^2 \sin \theta_0$$

Рівняння (2.3) тепер можна переставити, щоб отримати

$$\rho A_{rotor} v_{wind}^2 l_{rotor} = \rho A_{vane} v_{wind}^2 l_{vane} \sin \theta_0$$

Перестановка для θ_0 :

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{\rho A_{rotor} v_{wind}^2 l_{rotor}}{\rho A_{vane} v_{wind}^2 l_{vane}} \right)$$

І це може бути зведено до наступного вигляду:

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{A_{rotor} l_{rotor}}{A_{vane} l_{vane}} \right) \quad (2.4)$$

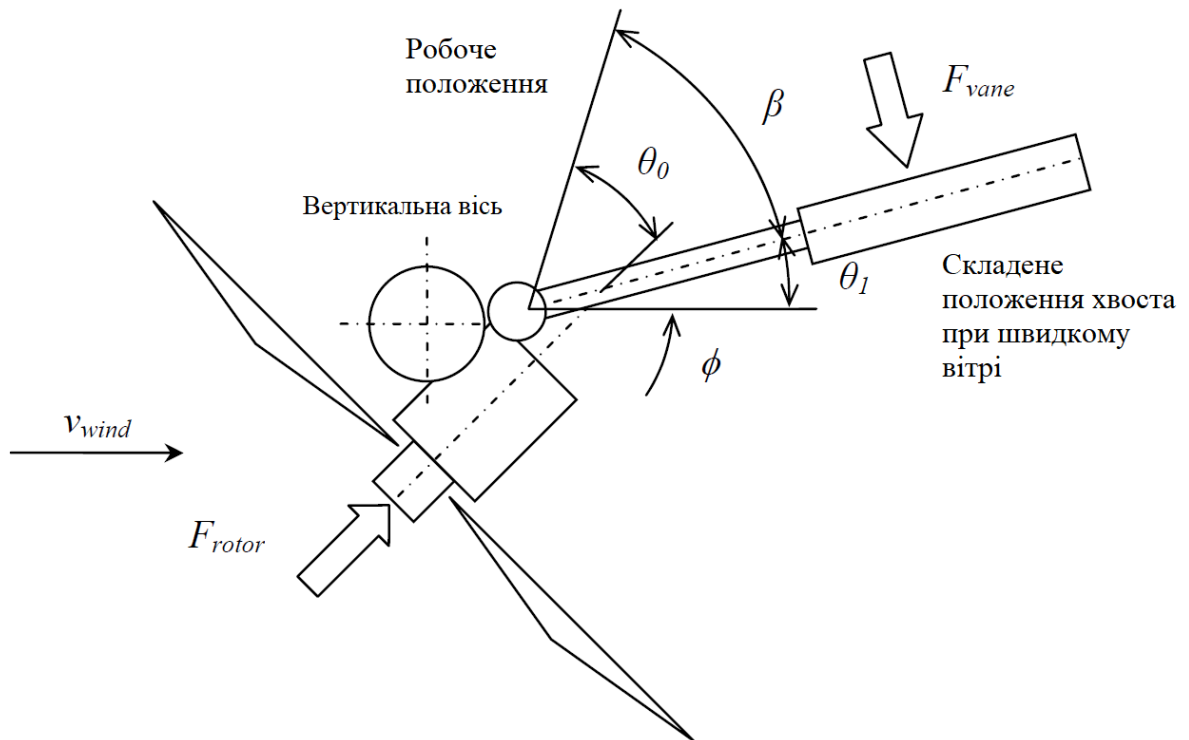


Рисунок 2.11 - Схема вітротурбіни із складеним хвостом при високих швидкостях вітру

Рівняння (2.4) демонструє, що кут відхилення хвостової частини для нормальних умов експлуатації, θ_0 , не залежить від швидкості вітру, v_{wind} . Це ідеальна ситуація, оскільки турбіна повинна залишатися нерухомою в діапазоні швидкостей вітру без неконтрольованого повороту навколо осі повороту. Сила, яка утримує хвіст під кутом зміщення θ_0 , - це вага хвоста, що діє на хвостову частину гребного гвинта в напрямку, дотичному до дуги, описаної гребним гвинтом. Кут зміщення хвоста залишатиметься в нормальному робочому

положенні, як показано на рисунку 2.10, доки сила вітру проти хвостового гвинта буде меншою, ніж сила ваги хвоста.

Посилаючись на рисунок 2.12, можна показати, що сила, спричинена вагою хвостової частини, має вигляд

$$W_t = m_{tail} g \sin \alpha$$

Ця сила діє в центрі ваги хвоста, тому для визначення суми сил, що діють на хвіст, її потрібно перенести в центр площі хвостової частини лопаті:

$$P_t = \frac{W_t l_{tail}}{r_{G,tail}}$$

Або,

$$P_t = \frac{m_{tail} g \sin \alpha l_{tail}}{r_{G,tail}}$$

де $r_{G,tail}$ - відстань від осі повороту хвостової частини до хвостової кг (м);

α - кут нахилу хвостової осі (радіани);

l_{tail} - відстань від осі повороту хвостової частини до центру площі лопаті (м).

Коли вітер збільшується до швидкості, при якій сила на хвостовій частині флюгера, F_{vane} , перевищує силу, що протидіє обертанню хвоста, P_t , хвіст буде обертатися. Величина сили, що залишилася, яка буде називатися силою закручування, F_{furl} , визначається за формулою:

$$F_{furl} = F_{vane} - P_t$$

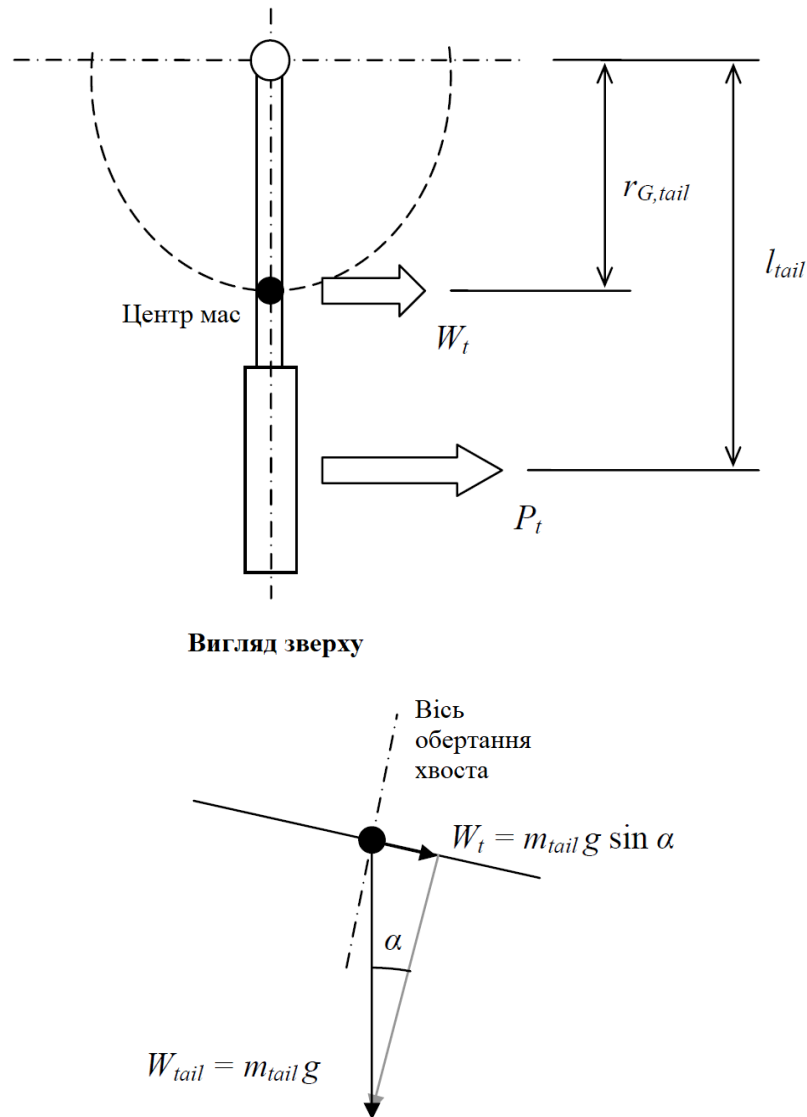


Рисунок 2.12 – Вигляд зверху хвостової частини та схема

Кут повороту хвоста, який викликає ця сила закручування, позначається через β , який можна визначити, розглянувши енергетичний баланс хвоста, що обертається. Робота, яку виконує скручуюча сила, дорівнює за величиною потенційній енергії хвоста в його новому положенні:

$$E_p = W$$

$$m_{tail} g h_{tail} = F_{furl} l_{arc} \quad (2.5)$$

де l_{arc} - довжина дуги, яку описує хвіст при згортанні під кутом β (м);
 h_{tail} - висота хвоста у згорнутому положенні (м).

З рисунку 2.13 видно, що висота підйому хвоста, h_{tail} , і переміщення хвоста, l_{arc} , є функціями кута згортання, β . Таким чином, рівняння 2.5 можна переставити, щоб зв'язати ці величини наступним чином:

$$\frac{l_{arc}}{h_{tail}} = \frac{m_{tail} g}{F_{furl}} \quad (2.6)$$

де

$$l_{arc} = \beta l_{tail}$$

$$h_{tail} = l_{tail} \sin \alpha - l_{tail} \cos \beta \sin \alpha$$

або

$$h_{tail} = l_{tail} \sin \alpha (1 - \cos \beta)$$

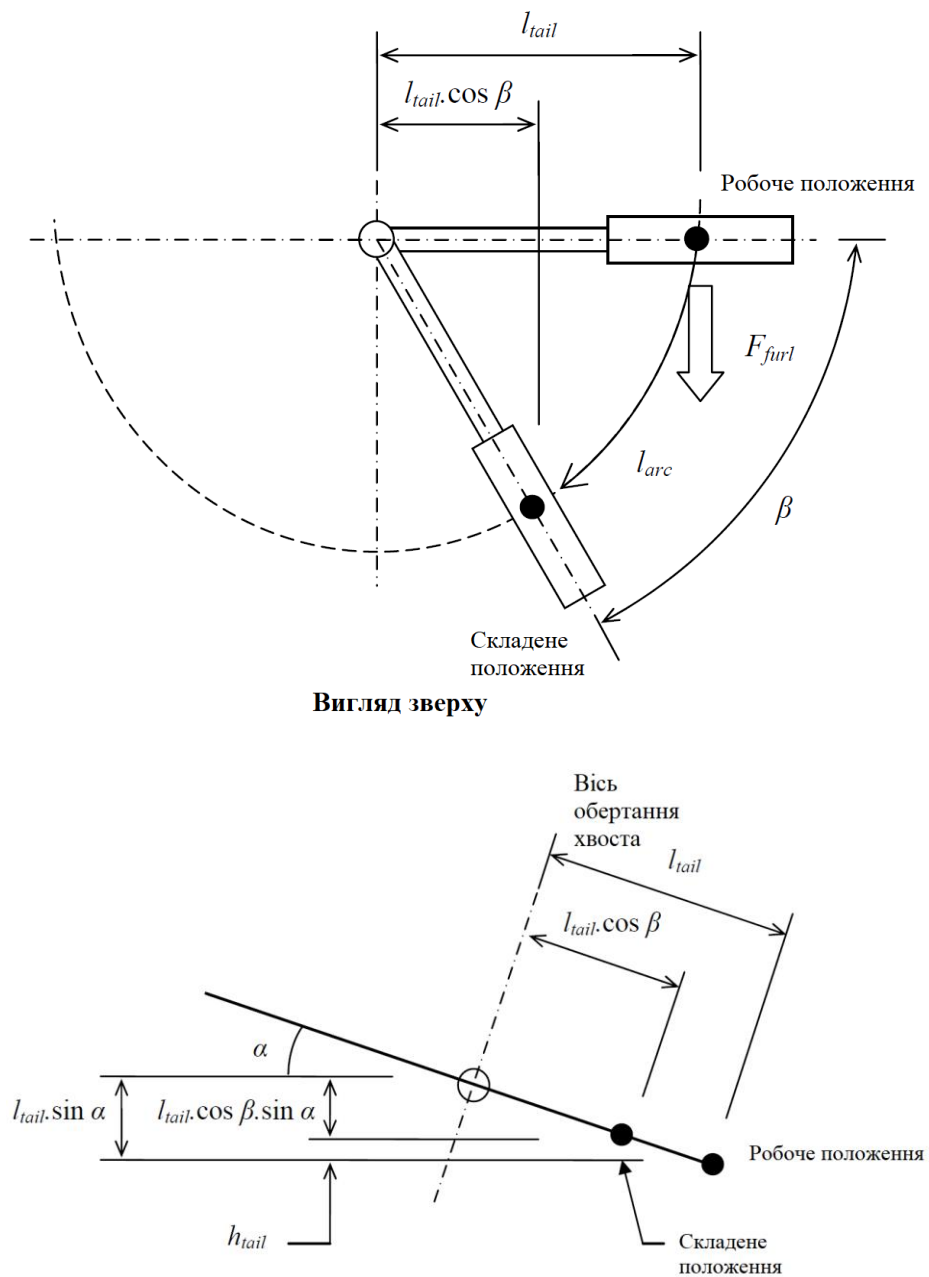


Рис. 2.13 - Вид зверху хвостового шарніра та схема

Тепер їх можна підставити в рівняння 2.6:

$$\frac{\beta l_{tail}}{l_{tail} \sin \alpha} \frac{1}{1 - \cos \beta} = \frac{m_{tail} g}{F_{furl}}$$

Яке можна скоротити і переставити, щоб отримати

$$\frac{\beta}{1 - \cos \beta} = \frac{m_{tail} g \sin \alpha}{F_{furl}}$$

Після визначення β можна розрахувати нові моменти повороту, щоб визначити новий напрямок осі ротора. Потужність, яку можна отримати від вітру, буде обмежена кутом нахилу осі ротора до напрямку вітру, таким чином, механізм повороту досягне своєї мети - контролювати потужність, що витягується, і швидкість ротора.

Знову звертаючись до рисунка 2.11, новий кут, що утворюється між хвостовою частиною і напрямком вітру, визначається за формулою

$$\theta_1 = \theta_0 + \phi - \beta$$

де ϕ - кут між віссю ротора і напрямком вітру (радіани).

Отже, беремо моменти навколо осі повороту:

$$\sum M_0 = 0 = F_{rotor} l_{rotor} \cos \phi - F_{vane} l_{vane} \sin \theta_1$$

При цьому стає:

$$\rho A_{rotor} v_{wind}^2 l_{rotor} \cos \phi = \rho A_{vane} v_{wind}^2 l_{vane} \sin \theta_0 + \phi - \beta$$

Переставимо місцями:

$$\cos \phi = \frac{\rho A_{vane} v_{wind}^2 l_{vane} \sin \theta_0 + \phi - \beta}{\rho A_{rotor} v_{wind}^2 l_{rotor}}$$

Це можна звести до:

$$\cos \phi = \frac{A_{vane} l_{vane} \sin \theta_0 + \phi - \beta}{A_{rotor} l_{rotor}}$$

Використовуючи наступну тригонометричну тотожність:

$$\sin u + v = \sin u \cos v + \sin v \cos u$$

Рівняння можна переставити так, щоб отримати:

$$\cos \phi = \frac{A_{vane} l_{vane} \sin \theta_0 - \beta \cos \phi + \sin \phi \cos \theta_0 - \beta}{A_{rotor} l_{rotor}}$$

Розгортаємо чисельник:

$$\cos \phi = \frac{A_{vane} l_{vane} \sin \theta_0 - \beta \cos \phi + A_{vane} l_{vane} \sin \phi \cos \theta_0 - \beta}{A_{rotor} l_{rotor}}$$

А потім ділимо на $\cos \phi$:

$$l = \frac{A_{vane} l_{vane} \sin \theta_0 - \beta + A_{vane} l_{vane} \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \cos \theta_0 - \beta}{A_{rotor} l_{rotor}}$$

де $\frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \tan \phi$.

Наведене вище рівняння тепер можна переставити для ϕ :

$$A_{vane} l_{vane} \sin \theta_0 - \beta + A_{vane} l_{vane} \tan \phi \cos \theta_0 - \beta = A_{rotor} l_{rotor}$$

$$A_{vane} l_{vane} \sin \theta_0 - \beta + \tan \phi \cos \theta_0 - \beta = A_{rotor} l_{rotor}$$

$$\sin \theta_0 - \beta + \tan \phi \cos \theta_0 - \beta = \frac{A_{rotor} l_{rotor}}{A_{vane} l_{vane}}$$

$$\tan \phi \cos \theta_0 - \beta = \frac{A_{rotor} l_{rotor}}{A_{vane} l_{vane}} - \sin \theta_0 - \beta$$

$$\tan \phi = \frac{A_{rotor} l_{rotor}}{A_{vane} l_{vane}} - \frac{\sin \theta_0 - \beta}{\cos \theta_0 - \beta}$$

$$\tan \phi = \frac{A_{rotor} l_{rotor}}{A_{vane} l_{vane}} - \tan \theta_0 - \beta$$

І, нарешті:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{A_{rotor} l_{rotor}}{A_{vane} l_{vane}} - \tan \theta_0 - \beta \right)$$

Таким чином, кут, який утворює вісь ротора з напрямком вітру, ϕ , був визначений для будь-якого кута закручування, β . Кут ϕ може бути використаний для визначення вихідної потужності ротора ВЕУ при будь-якій заданій швидкості вітру, використовуючи рівняння потужності і враховуючи кут між віссю ротора і напрямком вітру:

$$P = C_p \eta \frac{1}{2} \rho A_{\text{rotor}} v_{\text{wind}}^2 \cos \phi \quad (2.7)$$

Результатом такого математичного формулювання механізму закручування є те, що для будь-якої заданої швидкості вітру можна розрахувати вихідну потужність турбіни. Було розроблено електронну таблицю Microsoft Excel, яка дозволяє регулювати змінні системи для зміни кривої вихідної потужності. Невизначеними змінними є

m_{tail} - маса хвостової частини (кг);

A_{tail} - площа хвостового гвинта (м²);

l_{tail} - відстань від осі повороту хвоста до центру площі лопаті (м);

l_{vane} - відстань від осі повороту до центру площі хвостового оперення (м);

θ_0 - початковий кут зміщення хвостової частини (радіан);

α - кут нахилу хвостового оперення (радіани).

Значення цих змінних були скориговані разом з розробкою SolidWorks моделі корпусу турбіни. Це забезпечило фізичну реалістичність використаних значень. Налаштовуючи конструкцію вручну, важко досягти оптимальної конструкції, але, тим не менш, в результаті вдалося створити успішний механізм згортання. Крива потужності турбіни для різних швидкостей вітру показана на рисунку 2.14. Можна помітити, що зі збільшенням швидкості вітру видобута потужність зростає експоненціально до швидкості вітру близько 14 м/с. Після цієї швидкості вітру активується механізм згортання, який зменшує вихідну потужність ВЕУ, але захищає її від критичного перевантаження.

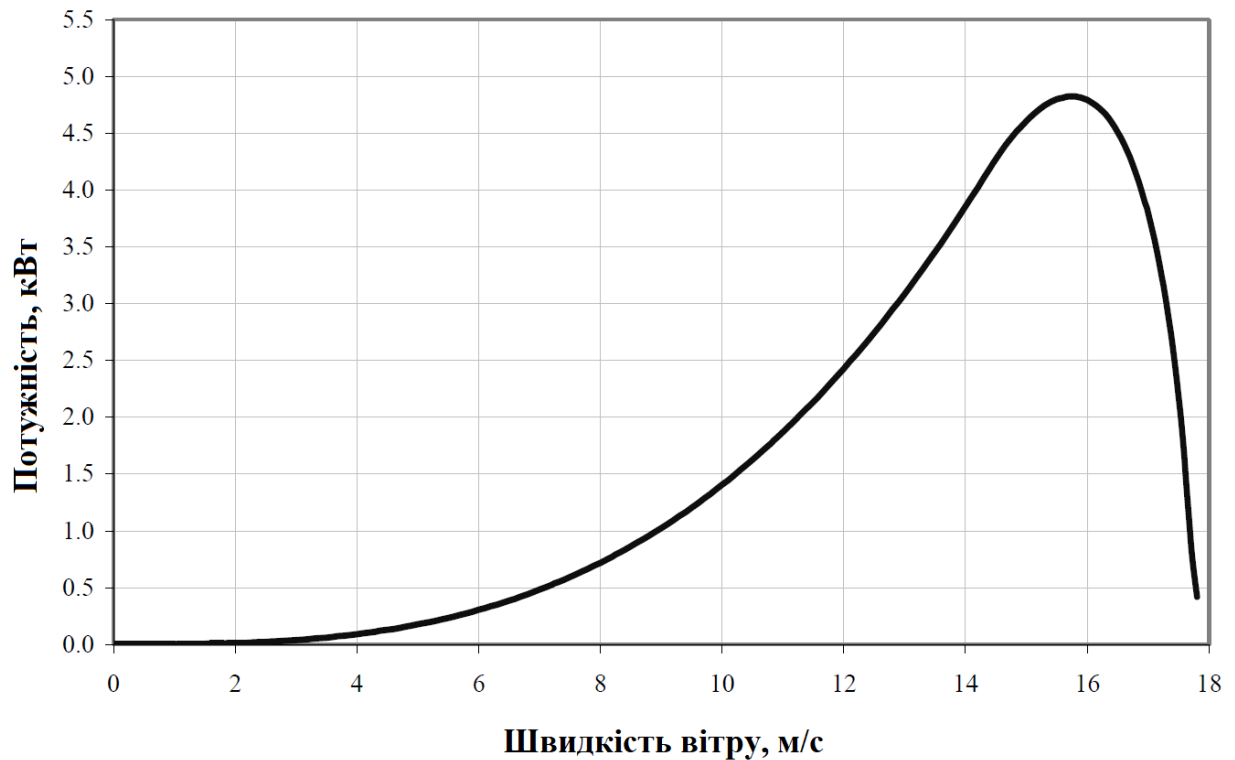


Рисунок 2.14 - Крива потужності SWT

2.6 Висновки до розділу

1. Наведено аналіз основних компонентів проектованої вітрової турбіни з горизонтальною віссю .
2. Описано основний принцип роботи вітроелектричної установки та функцію її кожної компоненти та наведено базову теорію, що лежить в основі виробництва вітрової енергії.
3. Наведено вітрові ресурси та планове місце розташування вітроелектричної установки.
4. Детально розглянуто конструкцію турбіни МВТ та визначено технічні характеристики пристрою. Кожен з необхідних компонентів систематично досліджений і сформульоване оптимальне рішення його параметрів.
5. Обрано електрогенератор, розраховано кількість та довжину лопатей, проведено розрахунок хабу, до якого кріпляться лопаті. Також

розраховано геометричні розміри корпусу і хвоста турбіни з механізмами відхилення і повороту.

6. В результаті розрахунків отримано криву потужності вітроелектричної установки, яка показує, що 1 кВт електроенергії установка вироблятиме вже при швидкості вітру 9 м/с, а при 15 м/с хвіст буде відхилятися і відвертати турбіну від прямого вітру. Таким чином запропонована конструкція системи захисту вітрогенератора від великих швидкостей вітру у працює.

ІЗОМЕТРІЯ

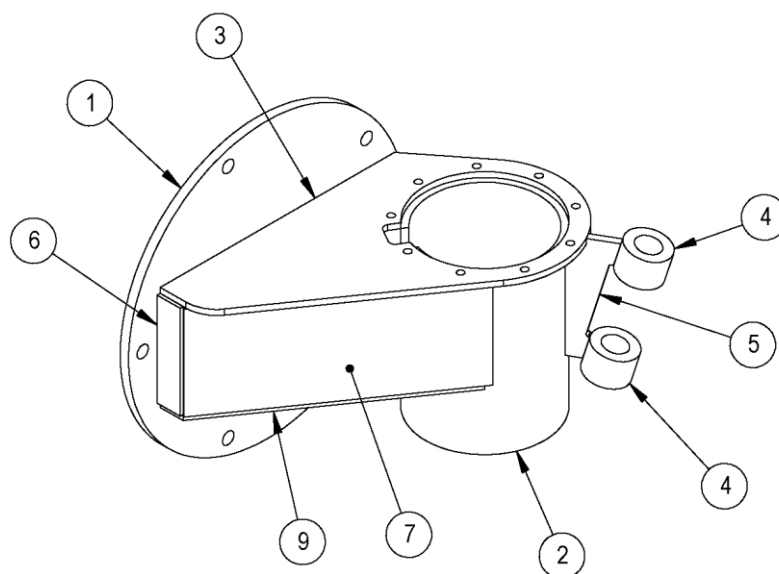


Рисунок 3.2 - Корпус турбіни

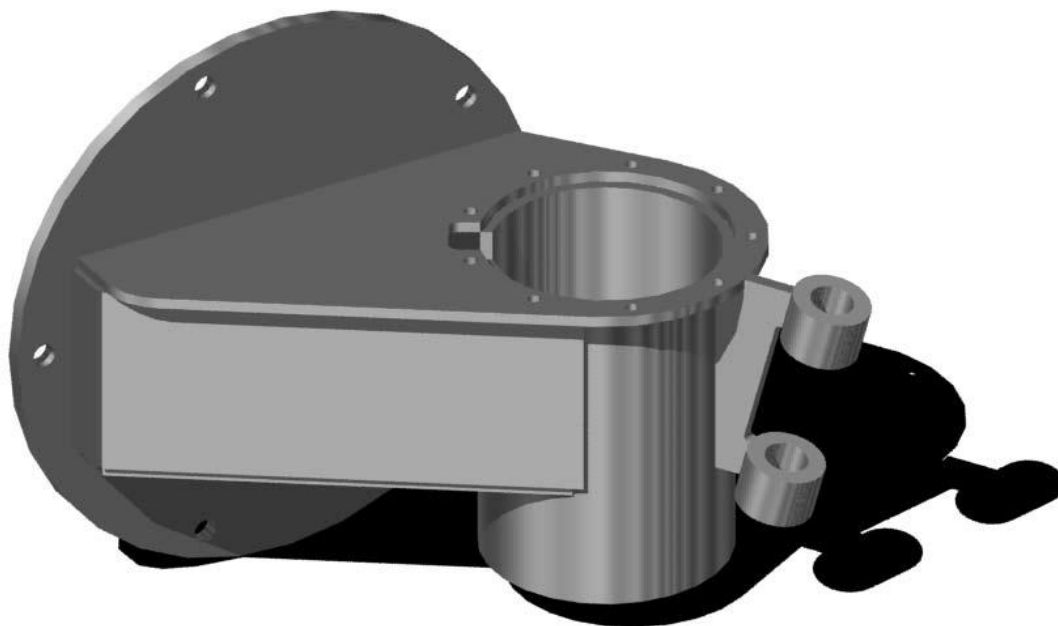


Рисунок 3.3 - Корпус турбіни

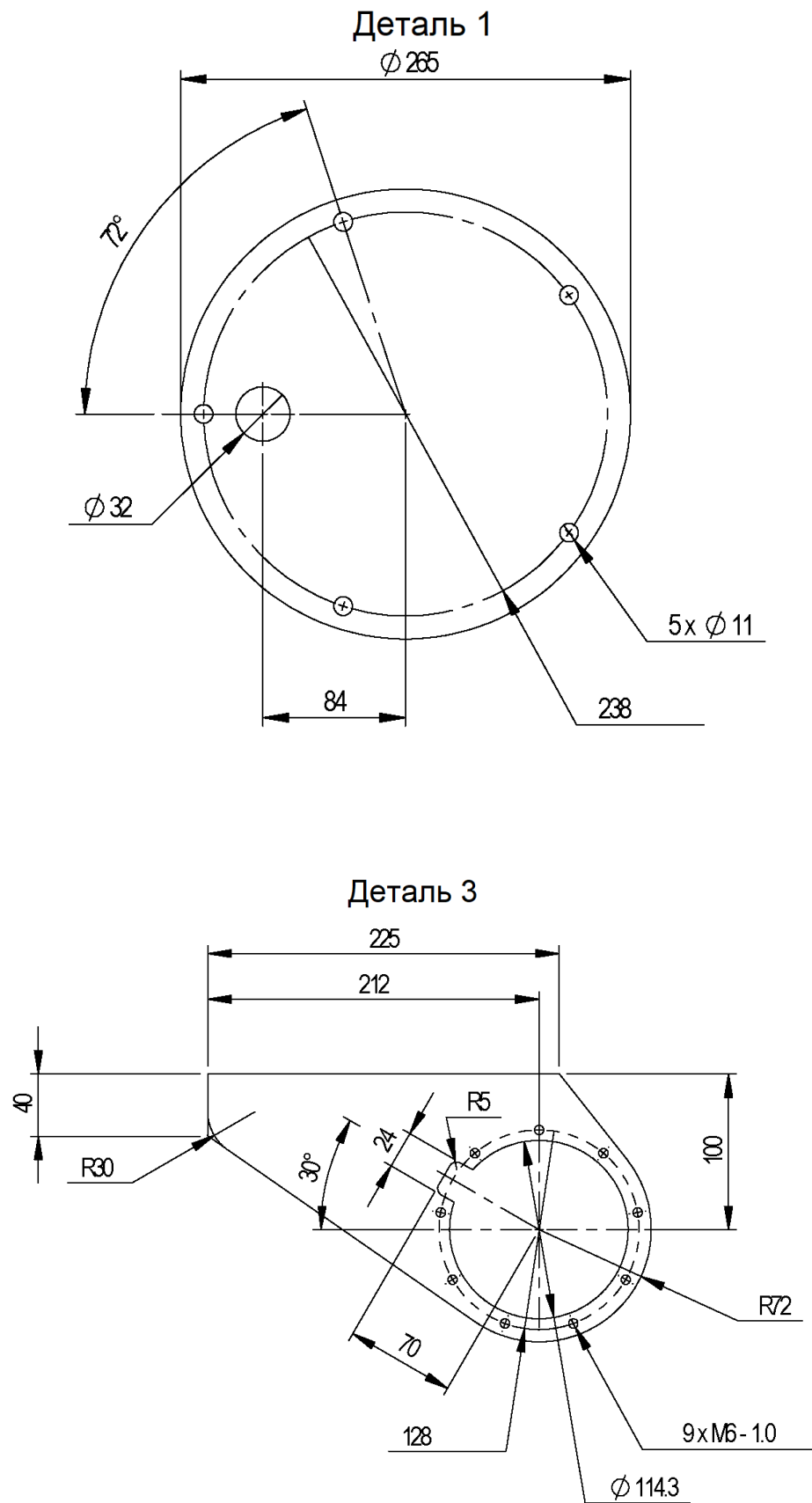


Рисунок 3.4 – Деталь 1 і 3

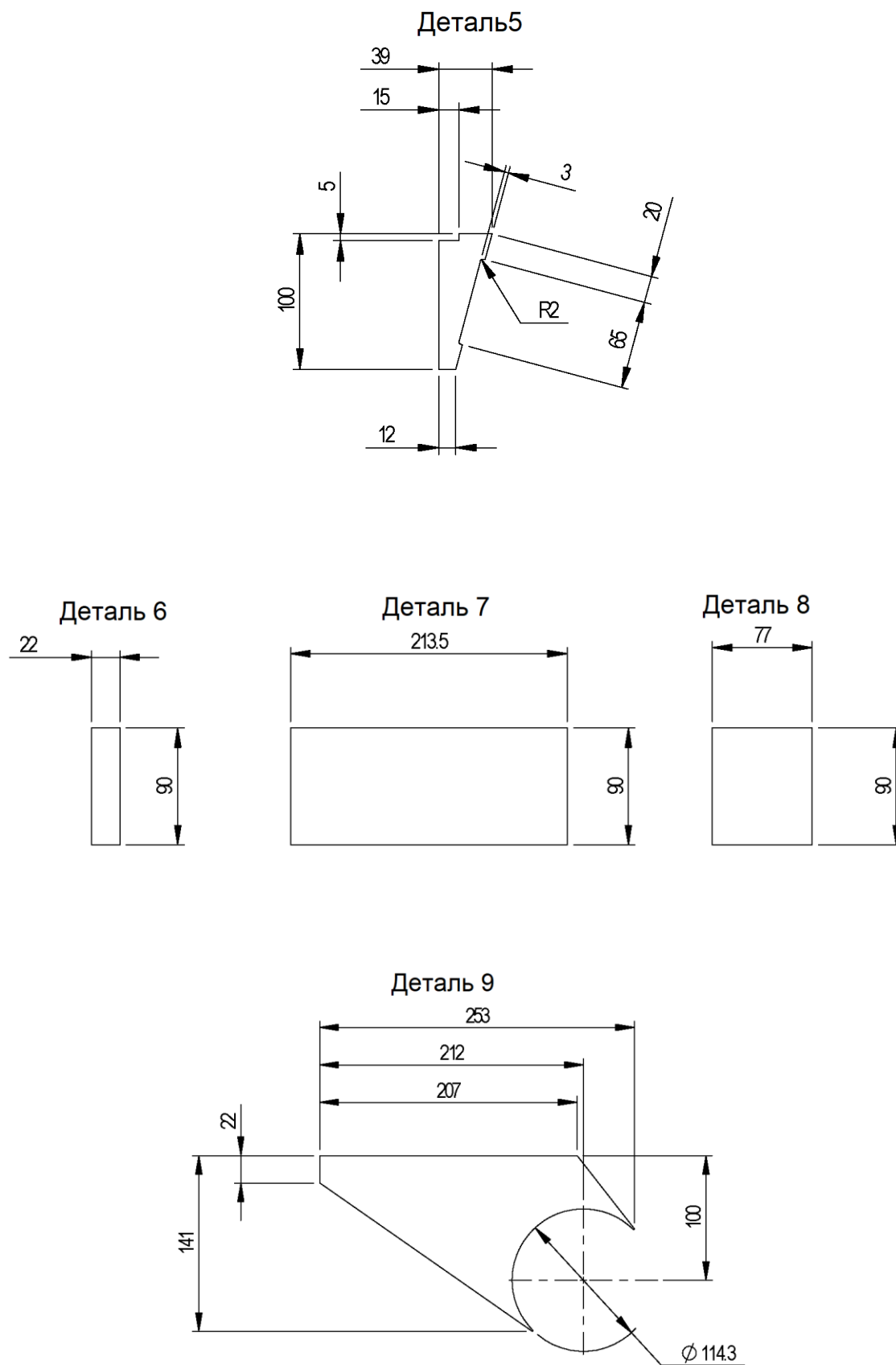


Рисунок 3.5 – Деталь 5,6,7,8 і 9

На рис. 3.6 і 3.6 зображено вигляд хабу, який кріпиться на вал і до якого кріпляться лопаті.

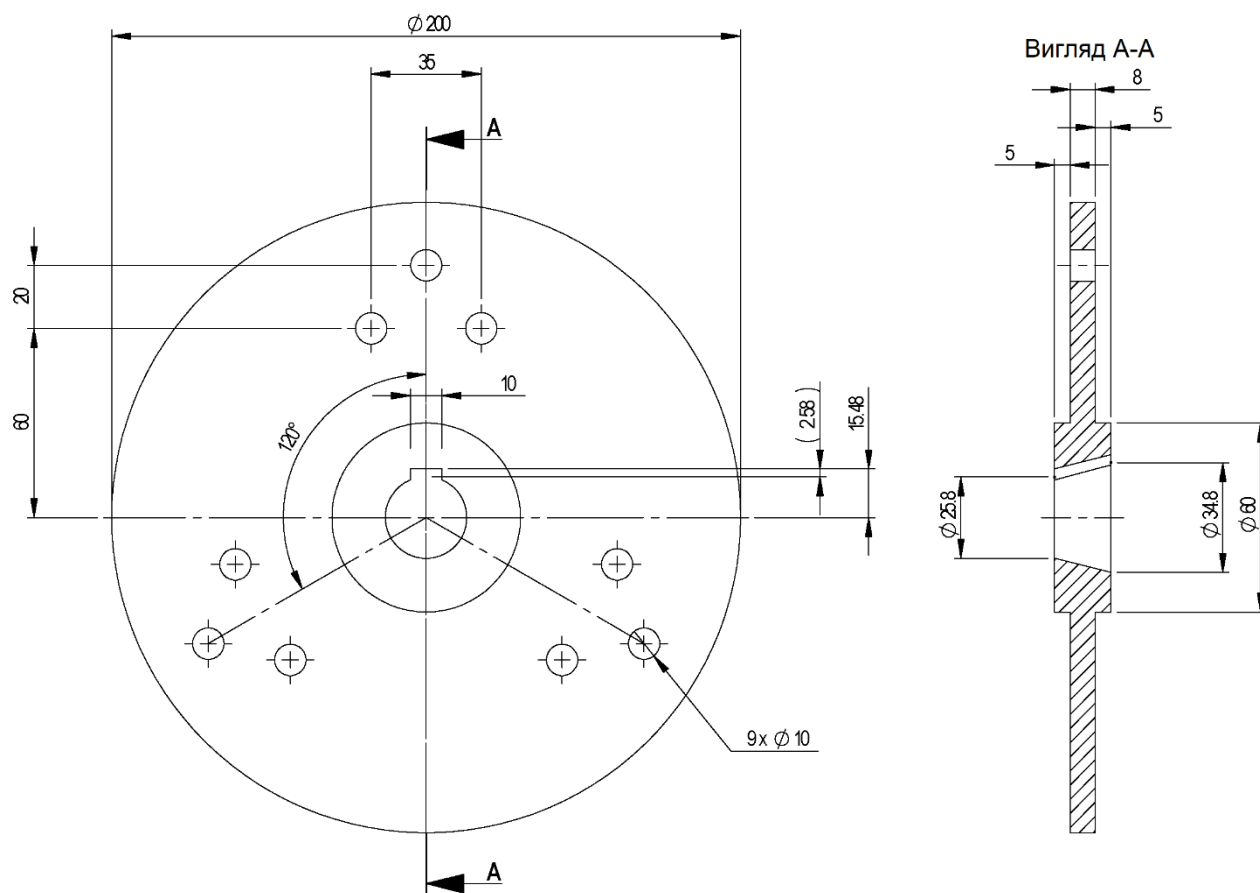


Рисунок 3.5 – Розміри хабу

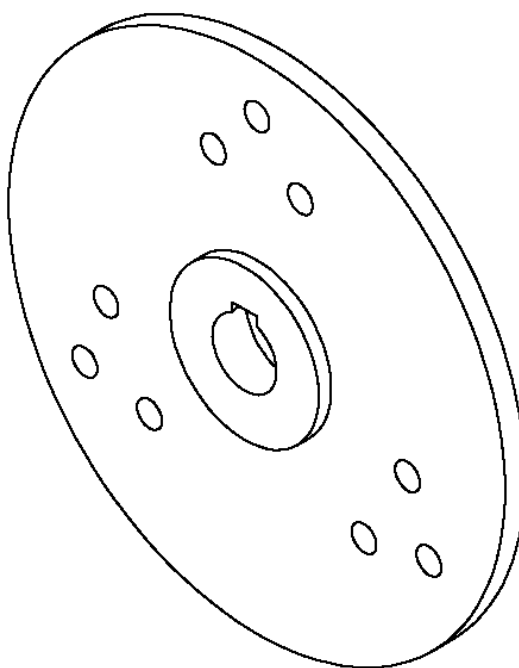


Рисунок 3.6 – Ізометричний вигляд хабу

Генератор кріпиться до великого круглого диска, через який проходять електричні вихідні кабелі. Ці кабелі залишаються всередині корпусу турбіни, де вони з'єднуються з контактними кільцями, встановленими в отворі головного валу. У верхній частині цієї осі передбачено отвір для доступу до контактних кілець і кабелів. Вісь головної осі є віссю відхилення, тому в ній передбачені підшипники. Бронзові підшипники ковзання були обрані завдяки їх здатності витримувати різноспрямоване навантаження, самозмащуванню та тривалому терміну служби. Ці підшипники також забезпечують деяке демпфування швидкості відхилення турбін, щоб зменшити будь-які гіроскопічні навантаження, які виникають. Нарешті, на зображенні показано нахилу вісь повороту хвостової частини, за допомогою якої механізм згортання досягає контролю потужності і кутової швидкості. Механізм складання хвоста зображено на рис. 3.7

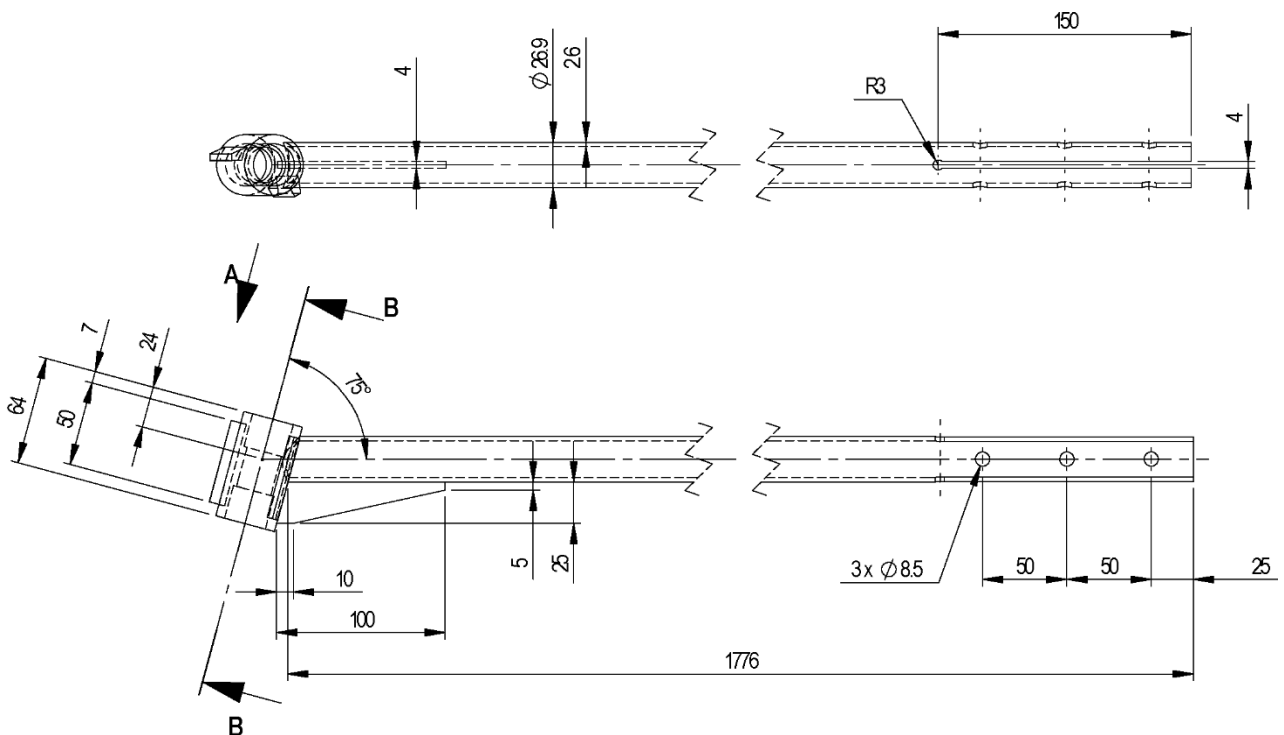


Рисунок 3.7 – Механізм складання хвоста



Рисунок 3.10 - Зображення вітротурбіни

3.2 Проектування вежі для кріплення вітротурбіни

Вежа необхідна для підняття ротора, щоб максимізувати доступну швидкість вітру і мінімізувати будь-яку турбулентність. Зі збільшенням висоти вежі можна отримати більшу кількість енергії вітру. Однак збільшення висоти вежі безпосередньо призводить до збільшення загальної вартості, на додаток до вищих витрат на транспортування і монтаж. Це також призводить до ускладнення обслуговування. Вежа підтримує корпус турбіни через шарнір, що обертається, який містить підшипники повороту і контактні кільця. Вісь повороту - це вертикальна вісь, вирівняна з центром вежі. Для підйому вежі необхідна опора, яка є пристроєм, що використовується як важіль для полегшення підйому, а також основа, яка забезпечує точку для повороту вежі під час підйому і опускання, і фундамент, який підтримує масу ВЕУ і міцно закріплює весь вузол на землі.

Конфігурація окремо стоячої вежі була обрана замість баштового або гратчастого типу через підвищену естетичну привабливість конструкції. Решітчасті вежі за своєю суттю є небезпечними, оскільки вони дозволяють людині підніматися на конструкцію, і їх важче опускати на землю для обслуговування. Для анкерної вежі потрібні відтяжки, які закріплюють вежу в декількох точках навколо основи. Це означає, що МВТ вимагає більшої площі, що може бути непосильним для домашнього користувача. Окремо стояча вежа має таку функцію, щоб вся конструкція була опущена на землю для обслуговування. Під час підйому та опускання вежі необхідно суворо дотримуватися заходів безпеки, але можливість обслуговування машини на рівні землі є значним покращенням у порівнянні з решітчастими вежами, де обслуговування повинно відбуватися на піднятій висоті хабу.

Остаточний проект вимагає висоти хабу 10 м від рівня землі. Окремо стояча конструкція має порожнисту конічну форму, з більшим діаметром і більшою товщиною стінок біля основи, що звужується до меншого діаметру і меншої товщини стінок у верхній частині. Важча секція забезпечує міцність там, де напруження на вигин є найвищими, тоді як легша верхня секція зменшує вагу конструкції там, де висока міцність не потрібна. Основа вежі зі склопластику буде утримуватися сталевую втулкою з точкою повороту біля рівня землі. Вежа буде підніматися і опускатися за допомогою ручної або електричної лебідки, прикріпленої до опори.

Під час нормальної експлуатації навантаження на вежу зумовлені власною вагою турбіни, силою тяги ротора і силою вітру, що діє на саму вежу. При піднятті або опусканні вежі вага вежі також створює згинальний момент в основі. Спочатку будуть розглянуті нормальні експлуатаційні навантаження.

З конструкції механізму згортання в розділі 2.5.4 було встановлено, що максимальна сила тяги на роторі становить 1406 Н, при швидкості вітру 15,4 м/с. Найбільша швидкість вітру становила 17,8 м/с, при цьому сила тяги ротора становила лише 100 Н. Таким чином, очевидно, що перший випадок найбільшої сили тяги дасть найбільшу загальну силу на вежу. Силу, що діє на вежу під

дією вітру, можна визначити, взявши середнє значення сили на половині висоти вежі, а потім врахувавши аеродинамічний опір на вежі, яку для цього випадку спрощено представимо у вигляді довгого циліндра.

Середня швидкість вітру на вежі може бути визначена за допомогою рівняння 2.1, яке обчислює швидкість вітру на будь-якій заданій висоті. Швидкість вітру розраховувалася з кроком 0,2 м і усереднювалася по всій висоті вежі, таким чином, швидкість вітру на висоті 10 м на втулці 15,4 м/с призвела до середньої швидкості вітру, v_H , що становить 13,3 м/с на висоті 5 м. Силу лобового опору вежі можна наближено визначити, використовуючи припущення про зовнішній, нестисливий і в'язкий потік над об'єктом. У цьому випадку об'єкт буде розглядатися як довгий циліндр. Сила лобового опору на вежі визначається за формулою [15]:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A_{tower} \rho v_H^2$$

де C_D - коефіцієнт опору на вежі;

A_{tower} - площа поверхні вежі (м²).

Коефіцієнт опору C_D можна визначити, обчисливши число Рейнольдса для повітряного потоку і зчитавши відповідне значення з емпірично отриманих даних на рисунку 3.11.

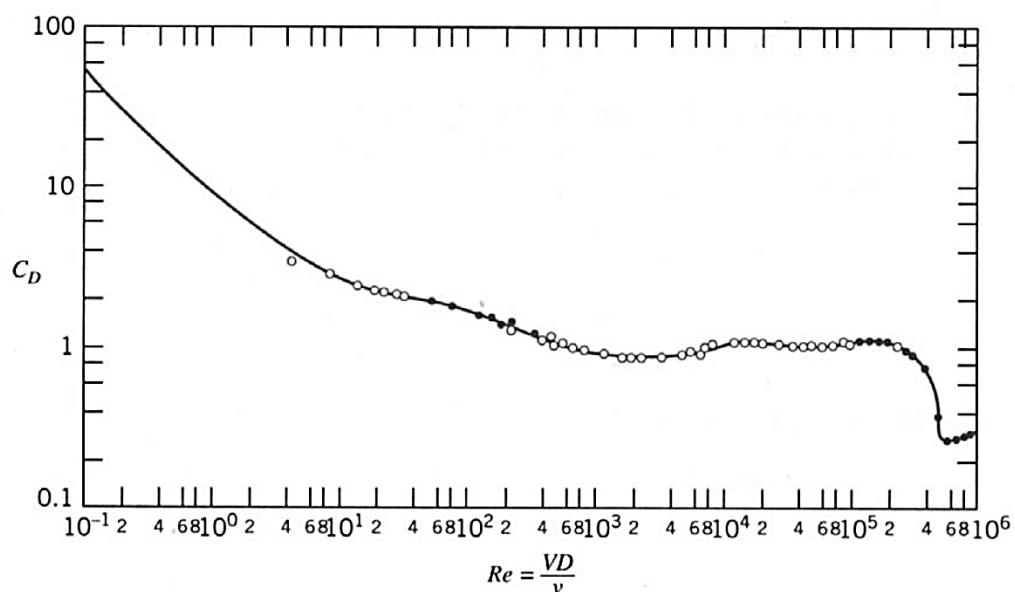


Рисунок 3.11 - Коефіцієнт опору для гладкого круглого циліндра як функція числа Рейнольдса

Число Рейнольдса, Re_D , визначається за формулою [15]:

$$Re_D = \frac{\rho v_H d_{turbine}}{\mu}$$

де $d_{турбіна}$ - середній діаметр вежі (м;)

μ - динамічна в'язкість (кг/мс).

На цьому етапі діаметр градирні невідомий, тому потрібен ітераційний підхід. Беручи значення 250 мм для середнього діаметру вежі та $1,79 \cdot 10^5$ кг/мс [15] для повітря при стандартному тиску та температурі, число Рейнольдса обчислюється як $2,2 \cdot 10^5$, а коефіцієнт опору можна зчитати з кривої на рисунку 2.11 як $C_D = 1,0$.

Таким чином, можна розрахувати силу опору на вежі, і в результаті отримаємо силу 267 Н, що діє в середній точці вежі, тобто на висоті $H = 5$ м. Потім можна розрахувати згинальний момент на вежі, використовуючи цю силу і силу тяги ротора 1406 Н. Розрахунковий згинальний момент становить 15 395 Нм, або його можна виразити як єдину силу, що діє у верхній частині вежі, яка дорівнює 1540 Н.

Геометрія вежі поки що невідома, хоча було прийнято середній діаметр 250 мм. Для визначення оптимальної геометрії, виходячи з прикладеної сили і максимально допустимого напруження, необхідний ітераційний підхід. Останнє базується на рекомендаціях керівника проекту, доктора Джаянта Епаараччі, на основі його попереднього досвіду і знань. Доктор Епаараччі рекомендував максимальне напруження 20 МПа, щоб врахувати втому вежі протягом терміну її експлуатації. Також була рекомендована наступна конструкція матеріалу:

- скловолокнисте ткане полотно з кутом нахилу $0-90^\circ$, 800 грамів на квадратний метр;
- 60 відсотків об'ємної частки;
- зовнішній шар з рубаних ниток (CSM) товщиною 1 мм.

Для проведення аналізу за допомогою ANSYS Workbench V.10 необхідно ввести властивості матеріалу. Структуру циліндра можна описати за допомогою рисунка 3.12.

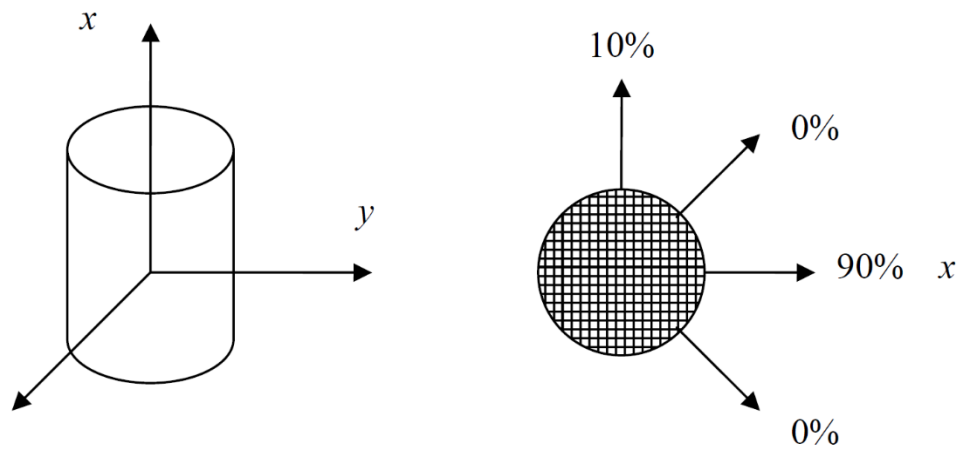


Рисунок 3.12 - Схема склопластикового циліндра

З наведеного вище можна визначити характерні властивості ортотропної пружності матеріалу. Гей, Хоа і Цай [16] надають таблиці для визначення властивостей матеріалу. З цих таблиць властивості матеріалу є такими [16]:

Поздовжній модуль пружності

$$E_x = 41,86 \text{ ГПа}$$

$$E_y = 15,36 \text{ ГПа}$$

Модуль зсуву

$$G_{xy} = 4500 \text{ ГПа}$$

Коефіцієнт Пуассона

$$\nu_{xy} = 0,23$$

$$\nu_{yx} = 0,09$$

$$\text{Теплове розширення } \alpha_x = 0,6 \cdot 10^{-5}$$

Перша оцінка геометрії градирні передбачає діаметр основи 300 мм з товщиною стінки 20 мм, що звужується до верхнього діаметру 150 мм з товщиною стінки 10 мм. Після введення даних про матеріал, застосування навантажень і обмежень до моделі та запуску рішення МСЕ були отримані результати аналізу. На рисунку 3.13 показано розподіл напружень у вежі, де

максимальне напруження становить 14,3 МПа. Таким чином, перша оцінка геометрії дає рівні напружень нижче допустимого максимуму в 20 МПа.

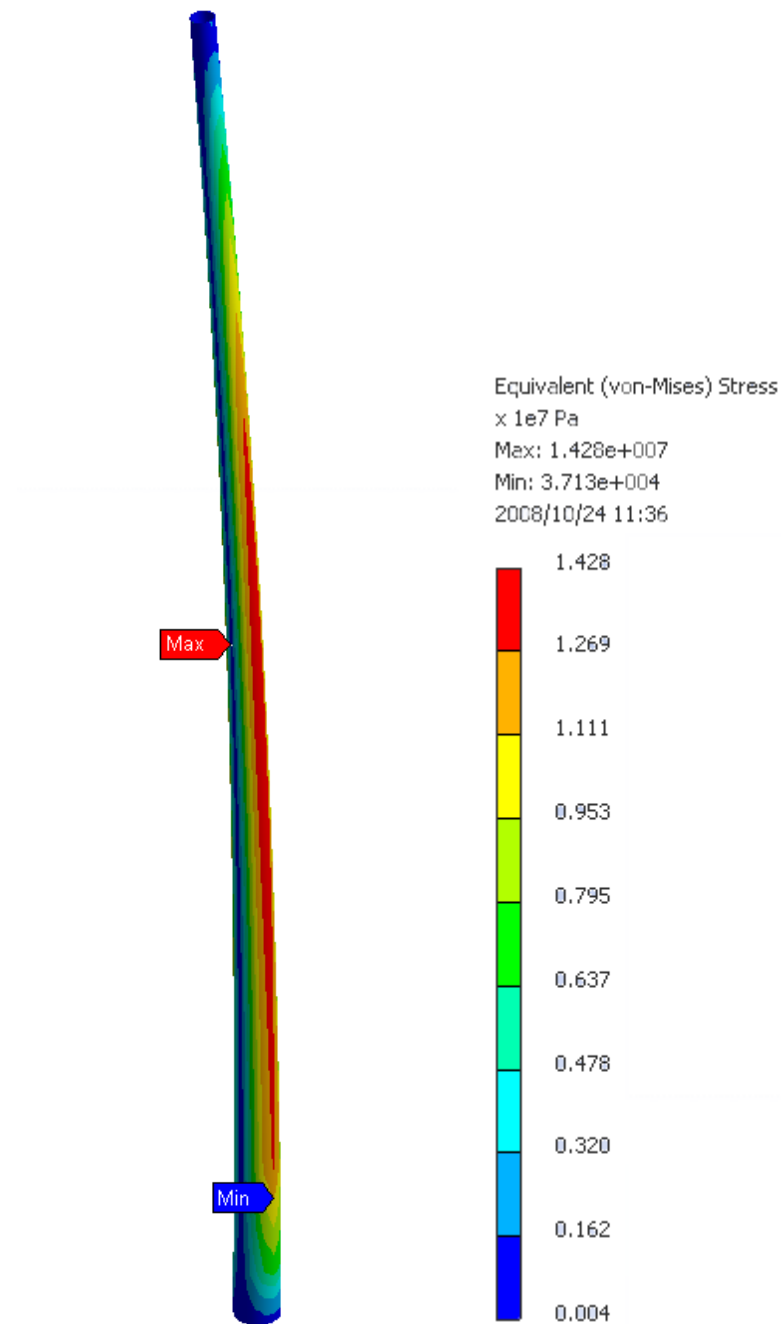


Рисунок 3.13 - Результати аналізу навантаження на вежу

Підйом і опускання вежі вимагає використання лебідки, яка закріплена на нерухомому фундаменті і з'єднана з опорою джина. Завдяки використанню поворотної основи вежу можна безпечно піднімати і опускати. Кінцева маса вежі становить 300 кг, тому можна визначити згинальний момент при піднятті та опусканні. Якщо взяти жердину довжиною 3 метри, з точкою кріплення на

відстані 3 метрів від точки повороту основи (див. рис. 3.14), то максимальний згинаючий момент, що створюється, становить 16,3 кНм. Знову ж таки, це можна вважати єдиною силою в 1630 Н, що діє у верхній частині вежі. Аналіз був проведений ще раз, в результаті чого максимальне напруження склало 15,1 МПа. Це напруження нижче максимального значення 20 МПа і вважається прийнятним.

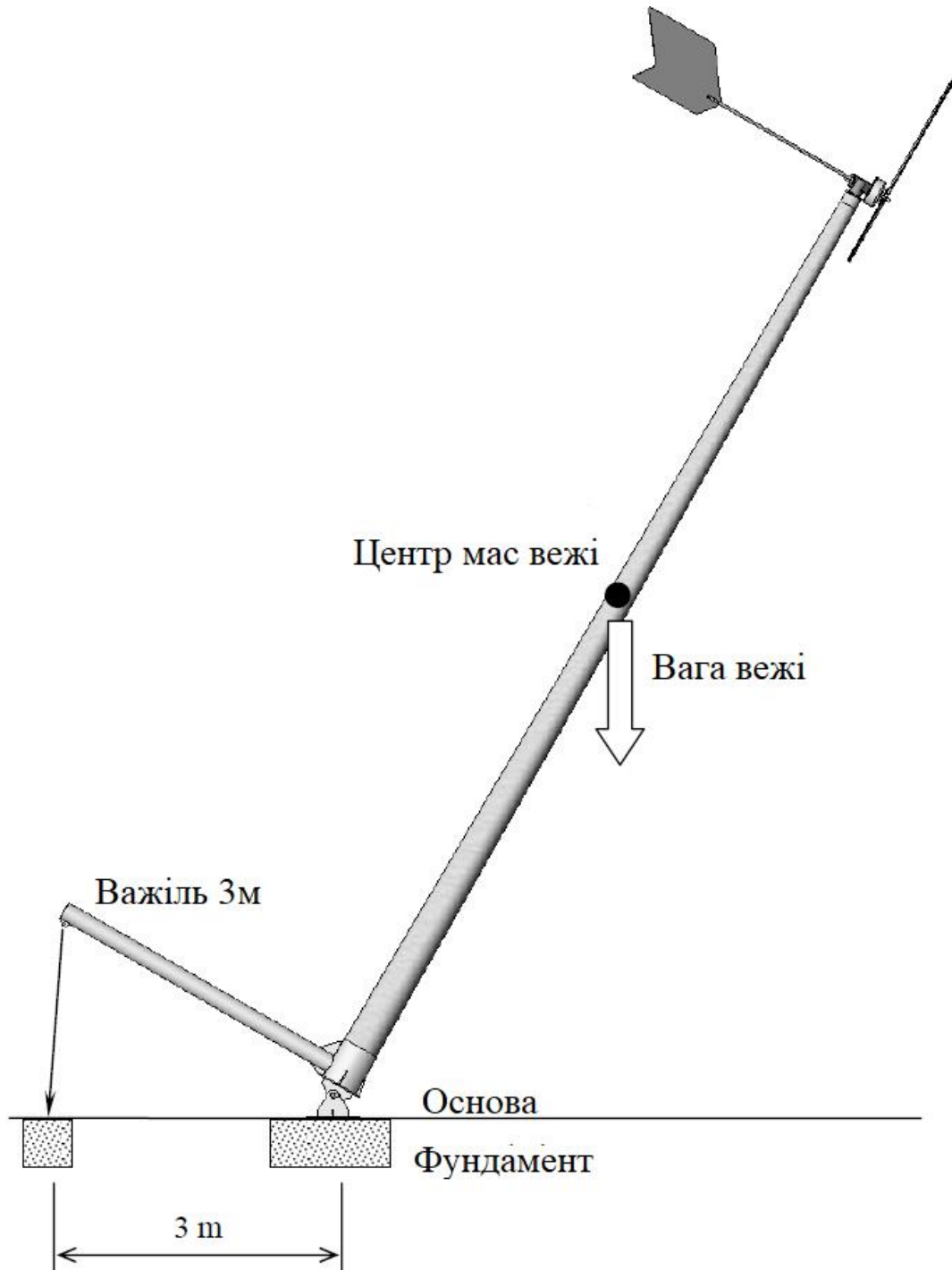


Рисунок 3.14 - Підняття/опускання вежі

3.3 Електричні системи та системи керування

Для завершення проектування ВЕУ необхідно розглянути електричні компоненти та компоненти керування [17]. Для передачі електроенергії від генератора до основи вежі знадобиться певна довжина кабелів. Потім кабелі потрібно під'єднати до контролера, який за допомогою випрямляча перетворить напругу на постійний струм і регулюватиме подачу енергії на батареї, щоб запобігти перевантаженню. Батареї повинні витримувати постійні цикли розрядки і перезарядки, тому вони мають бути вищого стандарту, ніж звичайні батареї, наприклад, ті, що використовуються в автомобілях. Блискавкозахист необхідний для захисту всієї електричної системи.

Контролер - це пристрій, який використовується для регулювання живлення акумуляторів під час роботи МВТ, і в багатьох випадках включає в себе випрямляч, необхідний для перетворення вихідної напруги змінного струму генератора в постійний струм для заряджання акумуляторів. Контролери відстежують напругу, що надходить на кожную батарею в батареї, і, як правило, перенаправляють надлишкову потужність на навантаження, щоб захистити батареї від перезарядки. Стандартний контролер коштує приблизно 800 доларів.

Батареї глибокого циклу будуть підходящим вибором, оскільки їхня конструкція сприяє забезпеченню сталої потужності без значного розряду струму протягом тривалих періодів часу. Багаторазові цикли розряджання та перезаряджання менш шкідливі для стану батареї, і вона здатна забезпечити стабільну потужність для передбачуваного застосування. Батареї глибокого циклу мають тривалий термін служби, що ідеально підходить для установки МВТ. Оскільки кінцеве використання згенерованої енергії невідоме, буде визначено базову комплектацію батареї. Подальше дослідження реальних циклів навантаження батареї дозволить зробити більш підходящий вибір батареї. Батарея ємністю 200 А·год.

Блискавкозахист часто досягається за рахунок використання металооксидних варисторів, які є недорогим електричним пристроєм, що шунтує струми, викликані екстремальними напругами, такими як стрибки, що зазвичай асоціюються з ударом блискавки. Загальна вартість системи для електричних і контрольних пристроїв оцінюється в 1000 доларів.

3.4 Специфікація вітроелектричної установки

У таблиці 3.1 наведені технічні характеристики проектованої системи. На рисунку 2.14 показано вихідну потужність МВТ. Електрична потужність відповідає вихідним характеристикам генератора, як показано на рисунках 2.5 і 2.6.

ВЕУ має номінальну потужність 1 кВт при швидкості вітру 10 м/с. Турбіна починає згортатися при 14,4 м/с, обмежуючи максимальну потужність до 4,8 кВт. Автоматичний механізм згортання не дозволяє турбіні працювати при швидкості вітру більше 18 м/с, щоб не перевищити максимальне навантаження на різні компоненти.

Пам'ятаючи, що середньодоброва швидкість вітру зимою в с. Петриків Тернопільській області становить 5,5 м/с і в піку до 8 м/с (див. розділ 2), річний вихід енергії з турбіни при такій швидкості вітру становить приблизно 1475 кВт·год.

На рис 3.15 представлено вітроелектричну установку.

У таблиці 3.2 показано розбивку витрат на компоненти, які складають загальну суму капітальних витрат.

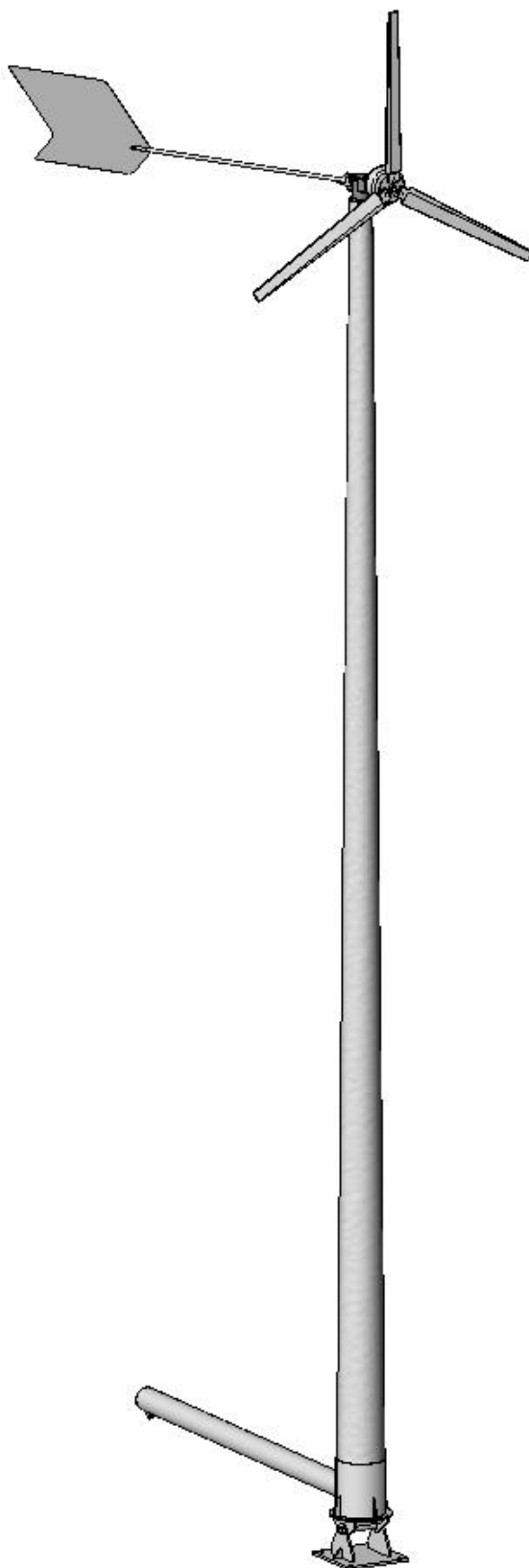


Рисунок 3.15 – Спроектowana BEY 1kW SolidWorks

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики проектованої системи

Модель	BEY 1kW
Потужність	
Номінальна потужність (Вт)	1000
Макс. Потужність (Вт)	4800
Швидкість вітру	
Номінальна швидкість вітру (м/с)	10
Стартова швидкість вітру (м/с)	2,4
Швидкість скручування вітру (м/с)	14,4
Швидкість обертання ротора	
Номінальна частота обертання ротора (об/хв)	440
Макс. Частота обертання ротора (об/хв)	858
Швидкість руху наконечника (м/с)	70,0
Ротор	
Кількість лопатей	3
Діаметр (м)	2,6
Площа поверхні ротора (м ²)	5,31
Матеріал лопатей	СКЛОПЛАСТИК
Генератор	
Тип	PMG
Номінальна напруга (В)	24 В ЗМІННОГО СТРУМУ
Кількість фаз	3
Регулювання потужності	Автоматичне згортання
Контактні кільця	Так
Система орієнтації	Пасивна за хвостом
Гальмівна система	Немає
Контролер	У комплекті
Вежа	
Тип	Окремо стояча склопластиковая
Висота (м)	10
Річний виробіток (кВт·год/рік)	
Середня швидкість вітру 4 м/с	329
Середня швидкість вітру 4,5 м/с	467
Середня швидкість вітру 5 м/с	642
Середня швидкість вітру 5,5 м/с	854
Середня швидкість вітру 6 м/с	1106
Середня швидкість вітру 7 м/с	1759
Середня швидкість вітру 8 м/с	2624
Середня швидкість вітру 10 м/с	5128

Таблиця 3.2 - Вартість системи

Позиція	Вартість за одну одиницю	Вартість за при виготовленні 100 шт
Генератор	370,5	302,25
Лопаті ротора	274,95	258,7
Втулка	120,25	91
Корпус турбіни та механізм згортання	2466,75	1730,95
Башта	1625	1462,5
Важіль та фундаментні плити	523,25	416
Контролер	780	702
Батарей	390	351
Допоміжні компоненти	130	130
Загальна вартість	6680,7	5444,4

3.5 Висновки до розділу

1. Наведено креслення та 3D вигляд корпусу вітротурбіни і представлено розміри усіх його деталей.
2. На основі проведених у попередньому розділі розрахунків представлено зовнішній вигляд хабу, який кріпиться на вал генератора і до якого монтується три лопаті.
3. Представлено механізм, який складає хвіст при швидкостях вітру більше 15 м/с та сам хвіст вітроелектричної установки.
4. Представлено результати розрахунку вежі висотою 10 м для вітроелектричної установки. З врахуванням матеріалу та конструкції вежі отримано її геометричні розміри. Проведено моделювання та

отримано величину механічних напружень у вежі при заданих значеннях навантаження.

5. Запропоновано та розраховано механізм підйому та опускання вежі.
6. Розглянуто електричні компоненти та компоненти керування.
7. Сформовано специфікацію вітроелектричної установки, яка містить детальний опис усіх її технічних характеристик.
8. Встановлено кількість електроенергії яка може вироблятися вітроелектричною установкою за рік при різних швидкостях вітру. Так при швидкості вітрів від 5,5 до 8 м/с можна отримати від 0,8 до 2,6 МВт·год/рік.

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 [19].

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[19]:

- 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 [20]:

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

1. Завдяки проведенню огляду літератури вивчено багато аспектів вітроенергетики. Це історія вітру як джерела енергії та сучасні технології, що застосовуються для використання наявної енергії, соціальні питання та вплив на навколишнє середовище, а також позицію малих вітрових турбін на світовому ринку.

2. Детально розглянуто конструкцію малої вітрової турбіни та визначено технічні характеристики пристрою. Кожен з необхідних компонентів систематично досліджений і сформульоване найбільш ефективне значення його параметрів.

3. Обрано електрогенератор, розраховано кількість та довжину лопатей, проведено розрахунок хабу, до якого кріпляться лопаті. Також розраховано геометричні розміри корпусу і хвоста турбіни з механізмами відхилення і повороту.

4. В результаті розрахунків отримано криву потужності вітроелектричної установки, яка показує, що 1 кВт електроенергії установка вироблятиме вже при швидкості вітру 9 м/с.

5. Запропонована конструкція системи захисту вітрової турбіни від великих швидкостей вітру, яка при 15 м/с буде відхиляти турбіну від прямого вітру.

6. Представлено результати розрахунку вежі висотою 10 м для вітроелектричної установки. З врахуванням матеріалу та конструкції вежі отримано її геометричні розміри. Проведено моделювання та отримано величину механічних напружень у вежі при заданих значеннях навантаження.

7. Запропоновано та розраховано механізм підйому та опускання вежі.

8. Сформовано специфікацію вітроелектричної установки, яка містить детальний опис усіх її технічних характеристик.

9. Встановлено кількість електроенергії яка може вироблятися вітроелектричною установкою за рік при різних швидкостях вітру. Так при швидкості вітрів від 5,5 до 8 м/с можна отримати від 0,8 до 2,6 МВт·год/рік.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Перспективи розвитку електроенергетики і роль відновлювальних джерел енергії// Невідомський М.В.; Копит М.Б.; Якимчук П.М.; Горлачук М.А.; Войтович І.А./Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 груд. 2024.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2024. Т. 2. – 17-18
2. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021
3. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.
4. Hau, E., & Renouard, H. (2006). Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics (Vol. 2). Berlin: springer.
5. Migliore, P., Van Dam, J., & Huskey, A. (2004, January). Acoustic tests of small wind turbines. In 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 1185).
6. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
7. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and

- its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.
8. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
 9. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
 10. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.
 11. 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.
 12. Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons.
 13. 1kw Wind Turbine Generator (GL-PMG-1000) <https://ginlong.en.made-in-china.com/product/wMumsIiJgtDH/China-1kw-Wind-Turbine-Generator-GL-PMG-1000-.html>.

14. Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2020). Fundamentals of machine component design. John Wiley & Sons.
15. Pritchard, P. J., & Mitchell, J. W. (2016). Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics. John Wiley & Sons.
16. Gay, D. (2022). Composite materials: design and applications. CRC press.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.