

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:

**ПРОЕКТУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОЇ
ВІТРОТУРБИНИ**

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

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Яковчук А.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Бабюк С.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

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

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

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

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Яковчуку Андрію Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування вертикально-осьової вітротурбіни

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

Затверджені наказом ректора від «29» жовтня 2024 року № 4/7-1023.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 23.12.2025

3. Вихідні дані до роботи прототипом проекрованої вертикально-осьової вітротурбіни є ротор Савоніуса. Вітротурбіна використовується для живлення насосу системи водопостачання

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

1. Аналіз конструкцій вертикально-осьових вітротурбін

2. Удосконалення конструкції ротора Савоніуса

3. Конструкція вітротурбіни

4. Випробування продуктивності

5. Результати вимірювань та розрахунків

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

1. Криві продуктивності різних турбін

2. Модернізація турбіни

3. Дворівневий ротор Савоніуса

4. Збірка з двох роторів

5. Вітроустановка в зборі

6. Результати розрахунків

7. Результати вимірювань

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В.М., проректор з АГРБ		

7. Дата видачі завдання 29.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Яковчук А.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Бабюк С.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 78 сторінок, __ аркушів презентації, 38 ілюстрацій, 13 таблиць та 23 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес перетворення вітрового потоку у електроенергію.

Предмет дослідження – вітрогенератор із вертикально-осьовою турбіною для живлення водонасосної установки.

Метою кваліфікаційної роботи є: розрахувати основні геометричні розміри та побудувати характеристики вертикально-осьової вітротурбіни.

У роботі, на основі проведеного аналізу конструкцій відомих вертикально-осьових вітрогенераторів, запропоновано удосконалити проєктовану конструкцію. Наведено основні параметри вітротурбіни та встановлено їх значення, при яких ефективність перетворення енергії вітру є найвищою. Проведено розрахунок конструкції ротора вітрогенератора призначеного для живлення вітро-водонасосної установки для забезпечення 100 людей водою. Отримано залежності частоти обертання турбіни, крутного моменту, вихідної потужності, коефіцієнта потужності, коефіцієнта крутного моменту від швидкості вітру для проєктованої вітротурбіни. Побудовано залежність необхідної площі вітрогенератора від швидкості вітру для отримання потужності, необхідної для живлення навантаження (водяний насос, потужністю 18,8 Вт)

Ключові слова: ЕНЕРГІЯ ВІТРУ, ВІТРОТУРБІНА, САВОНІУСА, ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Історія вітроенергетики	10
1.2 Енергія вітру	10
1.3 Швидкість вітру.....	11
1.4 Аналіз конструкцій вертикально-осьових вітротурбін	13
1.5 Процес проєктування вітроустановок.....	14
1.6 Висновки до розділу	16
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	18
2.1 Теорія вітроенергетичних установок	18
2.1.1 Підйомна сила і сила опору	19
2.1.2 Потужність вітру	20
2.1.3 Енергія вітру	20
2.1.4 Характеристики лопатей	22
2.2 Класифікації конструкцій вітрогенераторів	24
2.2.1 Горизонтально-осьові вітрогенератори	24
2.2.2 Вітрогенератори з вертикальною віссю.....	26
2.3 Вітрогенератор з вертикальною віссю Савоніуса.....	29
2.4 Удосконалення конструкції ротора Савоніуса.....	31
2.4.1 Модернізація турбіни	31
2.4.2 Оптимальні параметри вітрогенератора	32
2.5 Висновки до розділу	35
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	36
3.1 Особливості проєктування	36
3.2 Вимоги до конструкції.....	36
3.3 Конструкція вітротурбіни	37
3.3.1 Конструкція ротора.....	37
3.3.2 Розрахунок валу	41

3.3.3 Розрахунок підшипників	44
3.3.4 Конструкція рами вежі	45
3.4 Випробування продуктивності	50
3.4.1 Засоби вимірювання для випробування.....	50
3.4.2 Методика випробування.....	52
3.4.3 Отримані дані	52
3.4.4 Результати розрахунків	54
3.5 Результати вимірювань та розрахунків.....	62
3.6 Висновки до розділу	65
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	67
4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В	67
4.2 Теоретичні основи безпеки життєдіяльності	71
4.3 Пожежі та вибухи.....	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність проектування вертикально-осьових вітроелектростанцій постійно зростає, оскільки сучасні умови розвитку енергетики вимагають нових підходів до виробництва чистої та доступної електроенергії. Є кілька ключових факторів, що підсилюють інтерес до цього типу вітротурбін.

По-перше, вертикально-осьові вітроустановки ефективні в умовах нестабільних і турбулентних потоків вітру. На відміну від горизонтально-осьових турбін, вони не потребують орієнтації на напрямок вітру, що робить їх придатними для встановлення в густозаселених районах, між будівлями, біля промислових об'єктів чи на місцевостях зі складним рельєфом. У таких умовах традиційні вітроелектростанції працюють менш ефективно.

По-друге, важливим є підвищений рівень безпеки та екологічності. Вертикально-осьові турбіни створюють менше шуму, мають нижчу швидкість обертання лопатей та менш небезпечні для птахів і кажанів. Це зменшує екологічний вплив і дозволяє встановлювати їх ближче до житлової зони, шкіл, офісів чи інших соціальних об'єктів.

По-третє, простота конструкції та легкість обслуговування роблять такі установки привабливими з економічної точки зору. Більшість елементів розташовані ближче до землі, що спрощує монтаж і ремонт, а частина моделей має довший термін служби завдяки меншим механічним навантаженням.

Ще одним важливим аспектом є можливість розвитку розподіленої генерації. Вертикально-осьові вітротурбіни можна встановлювати на дахах будівель, у дворах підприємств, на фермерських господарствах чи навіть у приватних домоволодіннях. Це дозволяє користувачам самостійно виробляти електроенергію та зменшувати залежність від централізованих мереж.

Крім того, розвиток таких установок сприяє пошуку інноваційних рішень у сфері енергетики — нових матеріалів, конструкцій лопатей, систем керування

та накопичення енергії. Усе це підсилює інтерес науковців і інженерів до проектування ВО ВЕС.

Таким чином, актуальність проектування вертикально-осьових вітроелектростанцій полягає у їх здатності ефективно працювати в умовах міської та змішаної інфраструктури, економічності, екологічності та перспективності для майбутнього розвитку відновлюваної енергетики.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: розрахувати основні геометричні розміри та побудувати характеристики вертикально-осьової вітротурбіни.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати конструкції вертикально-осьових установок.
2. Розрахувати конструкцію вітротурбіни вітрогенератора.
3. Розрахувати характеристики вітротурбіни.
4. Встановити залежність основних характеристик проектованої вітротурбіни від швидкості вітру.
5. Встановити залежність площі вітрогенератора від швидкості вітру для отримання потужності, необхідної для живлення навантаження.

Об'єкт дослідження – процес перетворення вітрового потоку у електроенергію.

Предмет дослідження – вітрогенератор із вертикально-осьовою турбіною для живлення водонасосної установки.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістала подальший розвиток конструкція вітротурбіни Савоніуса, як враховує необхідні вимоги до експлуатації при середніх вітрах 5-7 м/с.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримано залежності частоти обертання турбіни, крутного моменту, вихідної потужності, коефіцієнта потужності, коефіцієнта крутного моменту від швидкості вітру для проектованої вітротурбіни.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на міжнародній науково-практичній конференції

„Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 28-29 травня 2025 року [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (23 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 79 сторінок, 13 таблиць, 38 рисунків.

Робота оформлена відповідно до методичних рекомендацій [2].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Історія вітроенергетики

Вітер використовувався для приведення в дію машин, здатних молоти кукурудзу, перекачувати воду, протягом сотень років. Перші вітряні машини використовувалися у Вавилоні та Китаї приблизно у 2000 році до н.е.. Горизонтальні вітрові турбіни з'явилися в Західній Європі в 12-му столітті і були відомі як голландські вітряки, що використовувалися для розмелювання кукурудзи.

Наприкінці 19-го століття в Північній Америці з'явилися американські багатолопатеві вітряки, які використовувалися переважно для перекачування води. Вітряки для перекачування води використовувалися в США для забезпечення водою ферм і міст.

У 1930 році, за оцінками, в США було 6 мільйонів насосних установок.

Протягом 20-го століття для виробництва електроенергії було впроваджено низку великих горизонтальних вітрогенераторів.

З розвитком використання викопного палива та поширенням використання електроенергії, виробленої з вугілля та нафти у 20-му столітті, відновлювана енергетика почала робити все менший внесок у задоволення світових енергетичних потреб.

Після енергетичної кризи 1970 року інтерес до вітрової енергії зріс. Вітрові машини для перекачування води були встановлені в багатьох країнах, особливо в сільській місцевості. Основним застосуванням механічних вітрових насосів на фермах є постачання питної води. На сьогоднішній день щорічне встановлення вітрових насосів, ймовірно, знаходиться в діапазоні від 5 000 до 10 000 одиниць по всьому світу [3].

1.2 Енергія вітру

Вітер - це повітря в русі. Це джерело чистої відновлюваної енергії.

Енергія вітру, як і більшість джерел енергії на землі, походить від сонця (і її можна описати як вторинну сонячну енергію). Близько 2,5% сонячної енергії у вигляді сонячного випромінювання поглинається земною атмосферою і повітря нагрівається. Гаряче повітря менш щільне, ніж холодне, і тому легше. Воно має менший тиск, ніж холодне повітря, а це означає, що при нагріванні холодне повітря втягується всередину. Тому нерівномірне нагрівання земної поверхні призводить до циркуляції повітря в атмосфері і породжує вітер.

Головні планетарні вітри виникають приблизно так само: найбільше тепла від сонця отримують на екваторі, і воно поступово зменшується до обох полюсів. Прохолодне приземне повітря змітає з полюсів вниз, змушуючи тепле повітря над тропіками підніматися вгору. Але на напрямок цих масивних повітряних потоків впливає обертання Землі. Обертання Землі створює прискорення для кожної частинки повітря. [3,4,5]

1.3 Швидкість вітру

Швидкість вітру вимірюється за допомогою анемометрів. Найпоширенішим типом є чашковий анемометр, який, по суті, є приладом, що підраховує обертання чашок, які обертаються зі швидкістю, пропорційною швидкості навколишнього вітру, і перетворює його в сигнали, що відображаються на індикаторі, який дає поточну інформацію на циферблаті або цифровому дисплеї.

Вітер сповільнюється біля землі і посилюється зі збільшенням висоти через вплив будівель, рослинності та самої землі. Тому дані про вітер повинні вказувати на висоту розташування анемометра. Вимірювання очікуваної різниці у швидкостях вітру між опорною висотою анемометра і запропонованою висотою вітрової турбіни дається за формулою [3]:

$$V_2 = V_1 (z_2 / z_1)^\alpha \quad (1.1)$$

де V_1 - відома швидкість вітру на висоті анемометрів (z_1);

V_2 - невідома швидкість вітру на висоті вітрогенератора (z_2);

α - постійний коефіцієнт, що залежить від опорної висоти (z_1), стабільності атмосфери та шорсткості поверхні. Середнє значення α приймається рівним $1/7$.

Вітер, що обтікає будівлі або дуже шорстку поверхню, демонструє швидкі зміни швидкості та напрямку, які називаються "слідом". Хвиля зменшує вихідну потужність вітроустановки і може викликати вібрацію на машині. Зона сліду показана на рисунку 1.1.

Якщо неможливо обійти всі перешкоди, турбіну слід розташовувати поза цією зоною впливу.



Рисунок 1.1 - Зона збуреного потоку [6]

Вершини пагорбів діють як своєрідні концентратори для повітряного потоку, що призводить до прискорення повітря біля вершин пагорбів. (Рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 - Прискорення на хребті

1.4 Аналіз конструкцій вертикально-осьових вітрогенераторів

Вертикально-осьові вітрогенератори становлять окремий напрям у розвитку сучасної вітроенергетики, і аналіз їх конструкції є важливою частиною проектування та вдосконалення таких установок. На відміну від горизонтально-осьових турбін, вертикально-осьові вітрогенератори мають вісь обертання, що розташована вертикально. Такий підхід дозволяє турбіні працювати незалежно від напрямку вітру, що особливо важливо в умовах міської забудови або на місцевостях зі складним рельєфом, де повітряні потоки часто змінюються та мають турбулентний характер [7].

Основою конструкції будь-якого вертикально-осьового вітрогенератора є ротор. Він складається з лопатей, форма та матеріал яких визначають аеродинамічні властивості установки. Існують два основні типи таких турбін — типу Дар'є та типу Савоніуса. Турбіна Дар'є працює за принципом підйомної сили, має вигнуті лопаті і може досягати високої швидкості обертання, проте інколи потребує стартового механізму, бо важко самостійно запускається при слабкому вітрі. Турбіна Савоніуса, навпаки, складається з півциліндричних або подібних до них лопатей, створює великий крутний момент при низькій швидкості вітру і добре самозапускається, хоча її загальна ефективність нижча.

Вертикальний вал, на який встановлений ротор, є ключовою частиною конструкції, адже він передає обертання до генератора. Зазвичай генератор розміщується внизу конструкції, що робить його обслуговування простішим і зменшує потребу в підйомному обладнанні. Важливу роль відіграють підшипники, які забезпечують плавність обертання і зменшують втрати енергії. Надійність підшипників визначає тривалість роботи всієї системи, оскільки на них діють значні навантаження, особливо при поривчастому вітрі.

Сама опорна конструкція — це стійка, рама або каркас, що утримує всі елементи вітрогенератора. Вона має бути достатньо міцною, стійкою до корозії

та вібрацій, адже вітрові навантаження можуть бути значними. Особливо це важливо для міських установок, де напрямки вітру непередбачувані.

Ефективність вертикально-осьових вітрогенераторів залежить від численних факторів. Форма лопатей визначає, як повітря обтікає ротор, а отже — і створювану силу обертання. Висота та діаметр ротора впливають на те, яку кількість енергії з потоку вітру можна перехопити. Маса ротора визначає легкість запуску: надто важкий ротор потребує сильнішого вітру, щоб розкрутитись. Важливим є також розташування вітрогенератора: у міських умовах будівлі можуть як посилювати, так і послаблювати потоки повітря, тому ретельний аналіз аеродинаміки місцевості є обов'язковим.

Попри певні недоліки, такі як нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з горизонтально-осьовими турбінами, вертикально-осьові вітрогенератори мають низку переваг. Вони тихіші, безпечніші для птахів, простіші в обслуговуванні та краще працюють у турбулентних потоках. Тому вони вважаються перспективним рішенням для розподіленої енергетики, коли електроенергія виробляється безпосередньо у місці споживання — наприклад, на дахах будівель, біля підприємств або в приватних господарствах.

Аналіз конструкції вертикально-осьових вітрогенераторів дозволяє визначити сильні та слабкі сторони кожного типу та забезпечує основу для розробки нових, більш ефективних моделей. Постійні дослідження в галузі матеріалів, аеродинаміки та енергозбереження сприяють тому, що такі установки стають дедалі поширенішими й ефективнішими, відкриваючи нові можливості для розвитку чистої та доступної енергетики.

1.5 Процес проєктування вітроустановок

Процес проєктування вітроустановок складається з послідовних етапів, кожен з яких впливає на ефективність, надійність і економічну доцільність майбутньої системи. Його можна назвати комплексним, оскільки він поєднує

інженерію, аеродинаміку, енергетику, економіку та екологію. Ось як зазвичай проходить проектування вітроустановок [6].

Спочатку проводять попередні дослідження та аналіз потреб. На цьому етапі визначають, для чого саме буде створена вітроустановка — для живлення будинку, підприємства чи для промислового виробництва електроенергії. Формують основні вимоги: потужність, місце встановлення, бюджет, обмеження за шумом та висотою.

Далі переходять до вивчення вітрових умов. Це один із найважливіших етапів. Збирають дані про річні та сезонні швидкості вітру, напрямки, рівень турбулентності. Для цього використовують метеорологічні звіти, вимірювання на місцевості або спеціальні мачти з анемометрами. Від якості цього аналізу залежить правильність усього проєкту, адже вітер — головне джерело енергії.

Після цього визначають оптимальний тип вітроустановки. Якщо місце рівнинне й із стабільними потоками — часто обирають горизонтально-осьові турбіни. Якщо присутня турбулентність або забудова — доцільні вертикально-осьові установки. Тут враховують аеродинамічні характеристики, коефіцієнт корисної дії, швидкість запуску та поведінку при сильному вітрі.

Потім розробляють конструкцію. Інженери визначають форму, розмір і матеріали лопатей, вибирають генератор, підшипники, вал, опори, систему керування, гальмування та захисту від перенавантаження. Створюють 3D-моделі, проводять аеродинамічні розрахунки, симуляції потоків повітря, аналіз вібрацій і міцності. На цьому етапі важливо розрахувати, як конструкція працюватиме як при слабкому, так і при сильному вітрі.

Також проєктують систему електропостачання: вибирають інвертор, контролер заряду, акумулятори (за потреби), систему підключення до мережі [8-15]. Потрібно забезпечити стабільну видачу електроенергії незалежно від коливань швидкості вітру.

Після цього аналізують місце встановлення. Визначають висоту щогли, основу, фундамент, шляхи обслуговування, безпечні зони та можливий вплив на довкілля. Для великих установок проводять екологічну експертизу.

Коли проєкт готовий, виготовляють прототип або окремі вузли. Проводять випробування в лабораторії та в натурних умовах. Перевіряють стартові характеристики, максимальну потужність, стабільність, рівень шуму, поведінку при поривах вітру. На основі результатів вносять коригування.

Завершальним етапом є виробництво, монтаж і пусконаладжувальні роботи. Монтують щоглу, ротор, генератор, електроніку, систему безпеки. Перевіряють роботу при різних режимах, налаштовують автоматичні системи гальмування та керування.

Після встановлення вітроустановка переходить у експлуатацію. Власник або технічна служба регулярно проводить огляд лопатей, підшипників, кріплень, генератора, контролює рівень шуму, перевіряє електроніку та змащує рухомі елементи. Це забезпечує довгий термін служби та стабільну роботу.

Таким чином, процес проєктування вітроустановок — це комплексна робота, що включає аналіз природних умов, інженерні розрахунки, моделювання, тестування та практичне впровадження. Успіх проєкту залежить від точності кожного етапу та гармонійного поєднання технологій, середовища та вимог користувача.

1.6 Висновки до розділу

1. Розглянуто питання історії виникнення та становлення вітроенергетики.
2. Розкрито поняття вітру та його характеристик. Увагу звернуто на енергію та швидкість вітру та особливостями її вимірювання.
3. Проведено аналіз відомих конструкцій вертикально-осьових установок. Встановлено, що вони мають рід переваг перед горизонтально-осьовими. Вертикально-осьові вітроустановки ефективні в умовах нестабільних і турбулентних потоків вітру. Вертикально-осьові турбіни створюють менше шуму, мають нижчу швидкість обертання лопатей та менш небезпечні для птахів і кажанів.

4. Встановлено, що актуальність проектування вертикально-осьових вітроелектростанцій полягає у їх здатності ефективно працювати в умовах міської та змішаної інфраструктури, економічності, екологічності та перспективності для майбутнього розвитку відновлюваної енергетики.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Теорія вітроенергетичних установок

Вітер володіє енергією завдяки своєму руху. Будь-який пристрій, здатний сповільнити масу повітря, що рухається, наприклад, вітрило або пропелер, може витягти частину енергії і перетворити її в корисну роботу. Потужність перетворювача енергії вітру визначається трьома факторами:

1. Швидкість вітру.

Мінімальна швидкість вітру, при якій лопаті будуть обертатися і виробляти корисну енергію, відома як швидкість зсуву, а мінімальна швидкість вітру, при якій вітрова турбіна буде виробляти свою номінальну потужність, є номінальною швидкістю.

2. Поперечний переріз (площа) вітру, що охоплюється ротором.

3. Загальний коефіцієнт корисної дії ротора, систем передачі та ефективності генератора або насоса. Жоден пристрій, як би добре він не був спроектований, не може видобути всю енергію вітру, тому що вітер повинен бути зупинений, а це перешкоджає проходженню більшої кількості повітря через ротор.

Вітряк працює за принципом перетворення кінетичної енергії вітру в механічну.

Коли вільний потік вітру проходить через ротор, вітер передає частину своєї енергії ротору, і його швидкість в роторі зменшується до мінімуму. Згодом потік вітру відновлює енергію з навколишнього повітря і на достатній відстані від ротора швидкість вільного вітру відновлюється, рис.2.1.

У той час як швидкість вітру зменшується, як описано вище, тиск повітря у вітровому потоці змінюється по-іншому, рис. 2.1. Спочатку він збільшується, коли вітер наближається до ротора, а потім різко падає на певну величину, коли він проходить через нього і енергія передається ротору. Врешті-решт тиск зростає до атмосферного тиску навколишнього середовища.

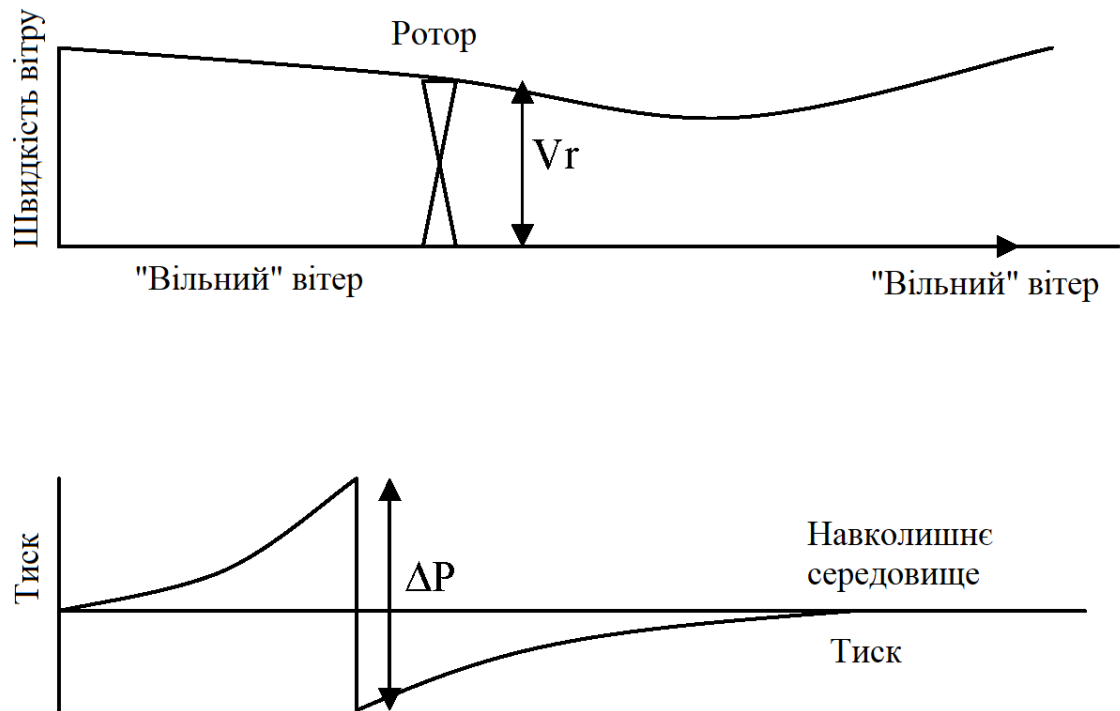


Рисунок 2.1 - Стан повітря при проходженні вітрового ротора [16].

2.1.1 Підйомна сила і сила опору

Конструкції вітроенергетичних установок можуть базуватися на підйомній силі або силі опору.

Підйомна сила:

Це сила, яку вітер чинить на лопать у напрямку, перпендикулярному до напрямку потоку.

Коефіцієнт підйомної сили:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}, \quad (2.1)$$

де L - підйомна сила.

Сила лобового опору: сила, що діє на лопать вітром у напрямку, паралельному напрямку потоку.

Коефіцієнт лобового опору:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}. \quad (2.2)$$

На рис. 2.2 показані підйомна сила і сила опору

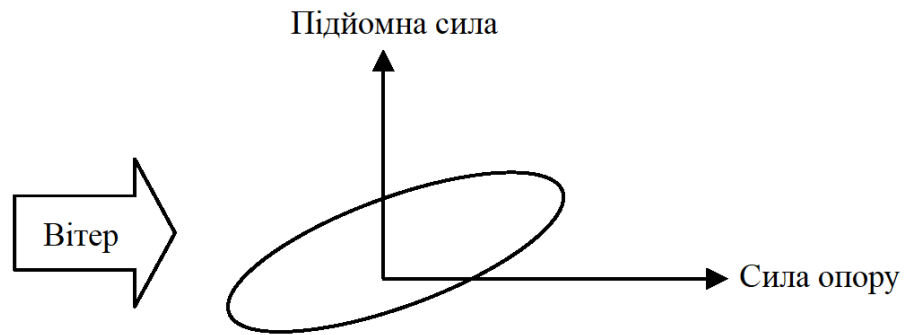


Рисунок 2.2 - Підйомна сила та сила опору

2.1.2 Потужність вітру

Потужність вітру визначається за формулою:

$$P = 0,5 \rho A V^3, \quad (2.3)$$

де V - швидкість вітру (м/с);
 ρ - густина повітря (кг/м³);
 A - площа, що охоплюється вітром.

Рівняння (2.3) показує, що

1. Потужність вітру змінюється як куб швидкості вітру.
2. Потужність пропорційна густині повітря. Щільність повітря змінюється залежно від висоти і температури.
3. Потужність пропорційна площі, що охоплюється вітром.

2.1.3 Енергія вітру

Взаємодія вітру з лопатями передає енергію цим лопатям. Однак вітер не повинен зупинятися, інакше більше вітру не зможе прийти.

Тому вітер, що відходить, забирає кінетичну енергію, тому вилучення енергії з вітру становить менше 100%.

Теорія лінійного імпульсу Беца робить висновок, що максимальне дробове вилучення енергії становить 16/27.

Коефіцієнт потужності:

$$C_p = \frac{\text{Потужність ротора}}{\text{Потужність вітру}} \quad (2.4)$$

$$C_p = \frac{P}{0,5\rho AV^3}$$

Максимальний теоретичний коефіцієнт потужності (Betz) $\max$ для підйомної машини становить:

$$C_{p_{\max}} = 16 / 27 = 0,593 \quad (2.5)$$

Для ідеальної машини опору:

Ідеальний коефіцієнт потужності для лобової машини може бути розроблений шляхом розгляду поведінки транслуючого лобового елемента, рис. 2.3. [16]



Рисунок 2.3 - Ілюстрація лобового опору

Швидкість вітру - V (м/с)

Швидкість лопаті - u (м/с)

Сила опору - D (Н)

Відносна швидкість (v):

$$v = V - u \quad (2.6)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A_b v^2 \quad (2.7)$$

A_b – площа проекції лопаті (площа, нормальна до напрямку вітрового потоку) (м²)

Потужність, що розвивається лопаттю:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A_b v^2 u \quad , \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{\text{Потужність, що розвивається}}{\text{Потужність вітру}} \\ &= \frac{\frac{1}{2} C_D \rho A_b v^2 u}{\frac{1}{2} \rho A_b V^3} \\ C_p &= \frac{C_D (V - u)^2 u}{V^3} \\ C_p &= C_D \frac{u}{V} \left(1 - \frac{u}{V} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт максимальної потужності:

$$\frac{dC_p}{d\left(\frac{u}{V}\right)} = 0 = C_D \left(1 - \frac{u}{V} \right) \left[\left(1 - \frac{u}{V} \right) - 2 \frac{u}{V} \right] = 1 - 3 \frac{u}{V} \quad (2.10)$$

Так що C_p максимальна при $\frac{u}{V} = \frac{1}{3}$

Підставимо в (2.9)

$$C_{p_{\max}} = \frac{4}{27} C_D \quad (2.11)$$

Рівняння (2.11) показує, що ідеальний коефіцієнт потужності збільшується зі збільшенням коефіцієнта опору.

2.1.4 Характеристики лопатей

Коефіцієнт крутного моменту

$$C_T = T / (0,5 \rho r A V^2) \quad (2.12)$$

де T - крутний момент (Нм)

Коефіцієнт швидкості кінчика лопаті

$$\lambda = \frac{\text{Швидкість кінчика лопаті}}{\text{Швидкість вітру}}$$

$$\lambda = \frac{r\omega}{V} \quad (2.13)$$

де λ - коефіцієнт швидкості кінчика лопаті;

r - радіус турбіни (м);

ω - кутова швидкість турбіни (рад/с);

v - швидкість вільного потоку вітру (м/с).

Ці характеристики геометрично зображені на рис. (2.4) і (2.5)

C_p , C_T і λ - безрозмірні коефіцієнти для потужності, крутного моменту і швидкості відповідно.

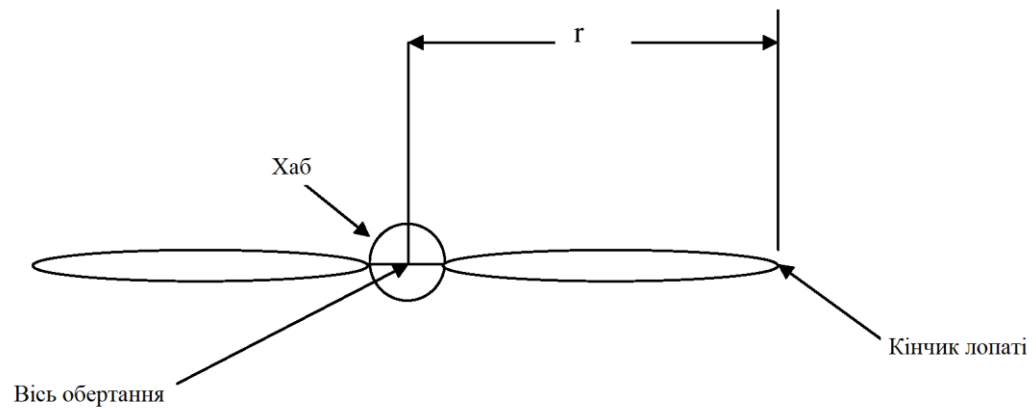


Рисунок 2.4 - Вітроколесо з горизонтальною віссю

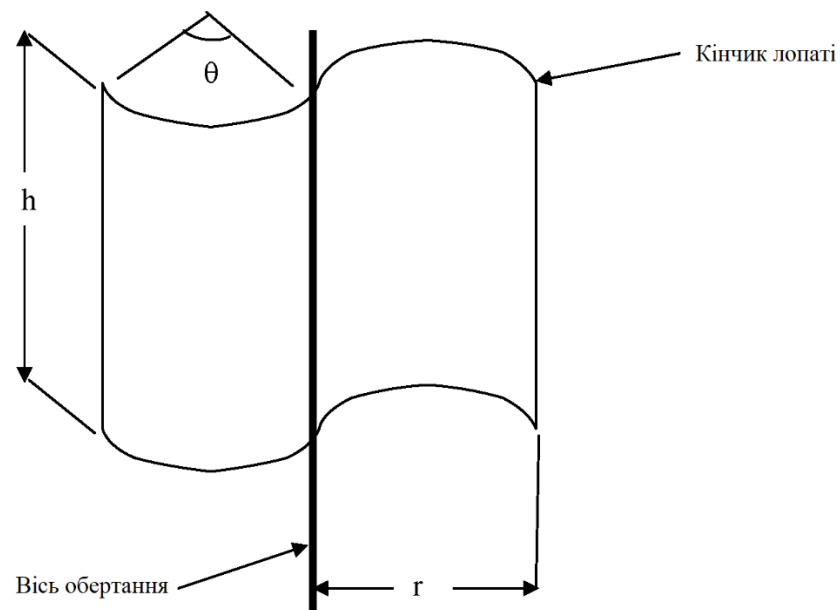


Рисунок 2.5 - Вітроколесо Савоніуса з вертикальною віссю

Механічна сила

$$P_m = \omega T, \quad (2.14)$$

$$P_m = 2\pi n T, \quad (2.15)$$

де ω - кутова швидкість (рад/с);

n - частота обертання ротора (об/с).

Таким чином, турбіна, що охоплює ту саму площу і виробляє ту саму потужність, але з більшим крутним моментом, буде працювати з меншою швидкістю.

Ефективність передачі

$$\eta_T = \frac{\text{Механічна потужність}}{\text{Вхідна потужність}} \quad (2.16)$$

$$\eta_T = P_m / P$$

Коефіцієнт перетворення потужності

$$e = C_p \eta_T. \quad (2.17)$$

2.2 Класифікації конструкцій вітрогенераторів

Вітрові турбіни класифікуються за віссю обертання на вітрові турбіни з горизонтальною віссю (ГВГ) та вітрові турбіни з вертикальною віссю (ВВГ).

2.2.1 Горизонтально-осьові вітрогенератори

Горизонтальні вітрогенератори є традиційною звичайною конструкцією. Вони, як правило, більш ефективні, ніж вертикальні, і всі підключені до мережі

комерційні вітрогенератори сьогодні є горизонтальними [16]. Але вартість горизонтально-осьових установок та їх башти є вищою порівняно з вертикально-осьовими установками, а їх проектування і виробництво є складнішим.

У вітрогенераторах з горизонтальною віссю вітер, що обтікає лопаті аеродинамічного крила, створює підйомну силу, яка може бути спрямована на обертання лопатей навколо осі. Горизонтально-осьові установки є найпоширенішими, з ротором, приводом і генератором, встановленими у верхній частині вежі. Тому вага є ключовим конструктивним обмеженням для горизонтально-осьових машин.

Під час роботи турбіни з горизонтальною віссю ротор може розташовуватися як з навітряного, так і з підвітряного боку вежі. Навітряна турбіна є самокерованою, тобто опір ротора змушує його слідувати за вітром, коли вітер змінює свій напрямок. Недоліком цього є те, що турбіна відчуває нерівномірне навантаження на ротор через затінення вітру вежею. Ротор з навітряного боку дозволяє уникнути впливу вежі на ротор.

Вітронасосна установка з горизонтальною віссю показана на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 - Горизонтальний вітрогенератор

2.2.2 Вітрогенератори з вертикальною віссю

Вертикальні вітрові турбіни бувають двох типів: конструкції на основі сили опору і конструкції на основі підйомної сили.

Конструкції на основі сили опору

Працюють як весло, що використовується для просування легкого човна по воді в річці. Якщо припустити, що весло не ковзає, то максимальна швидкість буде приблизно такою ж, як і швидкість, з якою ми тягнемо весло. Те ж саме стосується і вітру [16].

Анемометри з трьома чашками - це вітрогенератори з вертикальною віссю, кінці чашок ніколи не можуть рухатися швидше, ніж вітер, тому коефіцієнт швидкості кінчика лопаті завжди дорівнює одиниці або менше.

Хороший спосіб визначити, чи заснована конструкція ВВГ на опорі або підйомі, - подивитися, чи може коефіцієнт швидкості кінчика лопаті бути більше одиниці чи ні.

Конструкція на основі підйомної сили

Вони працюють швидше, ніж конструкції на основі опору, і коефіцієнт швидкості кінчика лопаті може бути більше одиниці.

Ротор Савоніуса працює за принципом ексцентричної сили опору, що створюється вітром на роторі навколо його осі обертання. Удосконалення конструкції ротора вводить підйомний ефект для кращої продуктивності.

Переваги ВВГ:

1. Проста конструкція.
2. Електроенергію можна подавати на рівні землі.
3. Їм не потрібен механізм рискання, оскільки вони завжди йдуть назустріч вітру.

Недоліки ВВГ:

1. Загальний коефіцієнт корисної дії низький у порівнянні з машинами з горизонтальною віссю.
2. Для заміни головних підшипників потрібно розібрати всю машину,

що призводить до додаткових витрат.

Криві продуктивності різних турбін показані на рисунку 2.7.

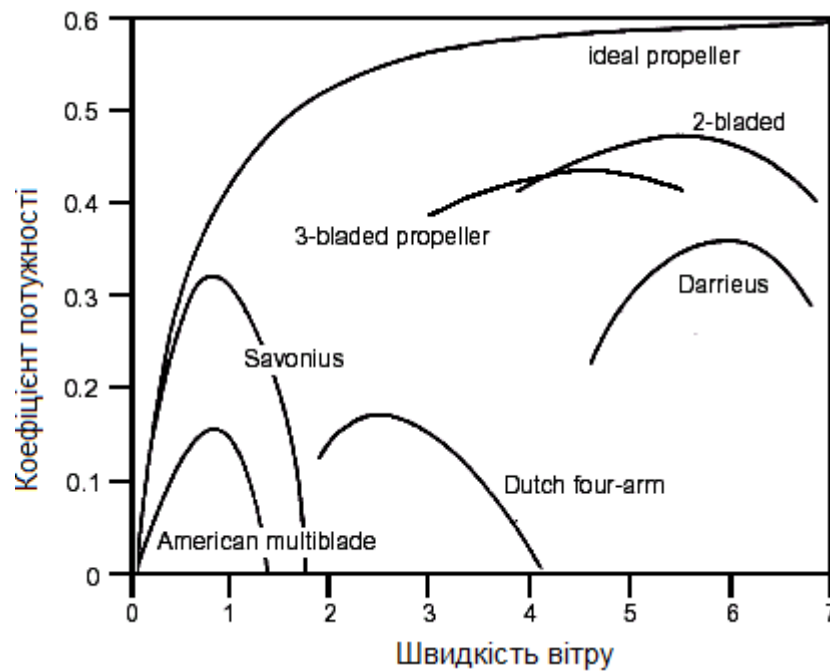


Рисунок 2.7 - Криві продуктивності різних турбін [12]

Існує два основних типи ВВГ:

1. ВВГ Дар'є

Darrieus - це машина з вертикальною віссю на підйомній основі. Вона була вперше запатентована французом Джорджем Дар'є в 1927 році ([16]). Вона має дві або три тонкі вигнуті лопаті з крилоподібним поперечним перерізом, обидва кінці лопатей прикріплені до вертикального валу. Таким чином, сила, що діє на лопаті при обертанні, є чистим натягом. Це забезпечує жорсткість, яка допомагає протистояти силам вітру. Таким чином, лопаті можуть бути легшими, ніж у пропелерного типу, рис. 2.8. Інший тип машини - з прямими лопатями - називається Giromills, рис. 2.9.

Основне використання машини Дар'є - це виробництво електроенергії.

Переваги турбіни Дар'є:

1. Приймають вітер з будь-якого напрямку.
2. Може бути встановлена на землі
3. λ і C_p значно вищі порівняно з турбіною Савоніуса

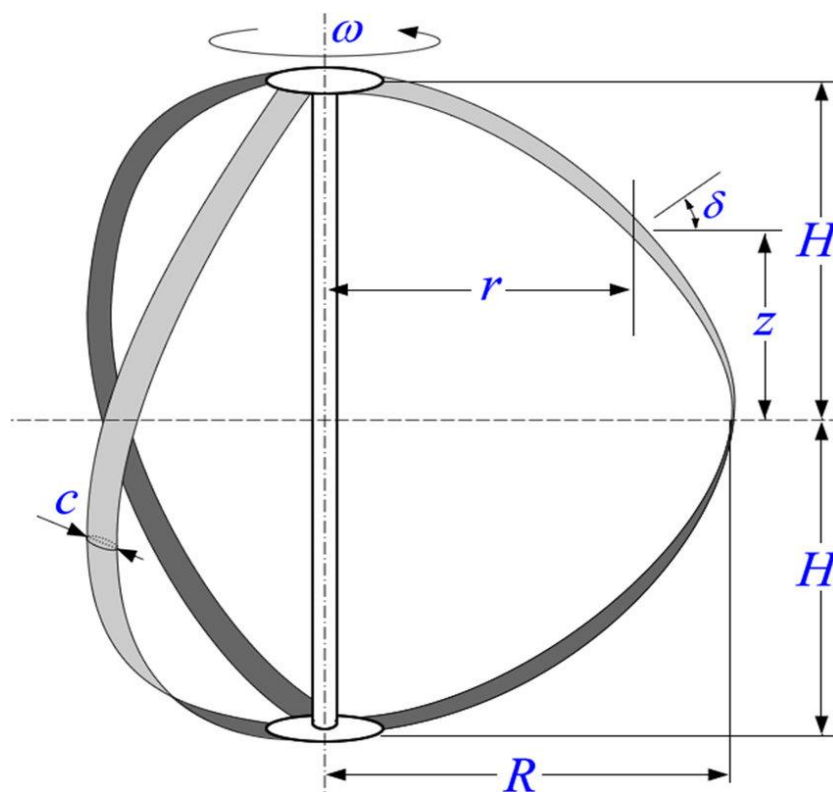


Рисунок 2.8 - Вітрогенератор Дар'є

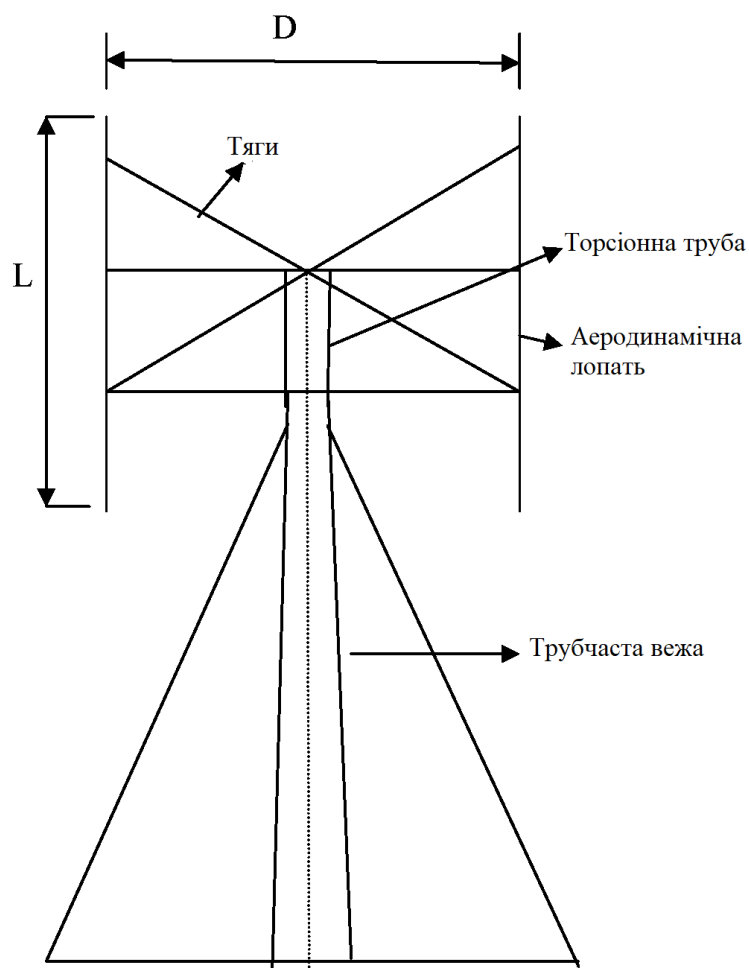


Рисунок 2.9 - Вітряк Giromill [16]

Недоліки турбіни Дар'є [3]:

1. Потребує зовнішньої механічної допомоги для запуску.
2. Ефективність нижча порівняно з ГВГ.
3. Оскільки вона, як правило, розташована близько до землі, вона також може зазнавати впливу вітру з меншою швидкістю.
4. Машині може знадобитися підйомний трос, щоб утримувати її в повітрі.

2.3 Вітрогенератор з вертикальною віссю Савоніуса

Предметом нашого дослідження є ротор, що працює на основі опору, розроблений у 1924 році у Фінляндії Сігурдом Савоніусом (Sigurd J. Savonius). Ця машина не є чисто аеродинамічною машиною, і хороший ротор Савоніуса може перевищувати коефіцієнт швидкості вітроколеса на одиницю, але не набагато [16].

Мабуть, найпростішим типом систем перетворення енергії вітру є турбіна Савоніуса. Основна конструкція ротора Савоніуса виготовляється шляхом розрізання циліндра вздовж його осі на дві половини і зсуву цих половин вздовж площини розрізу до утворення форми, показаної на рис. 2.10.

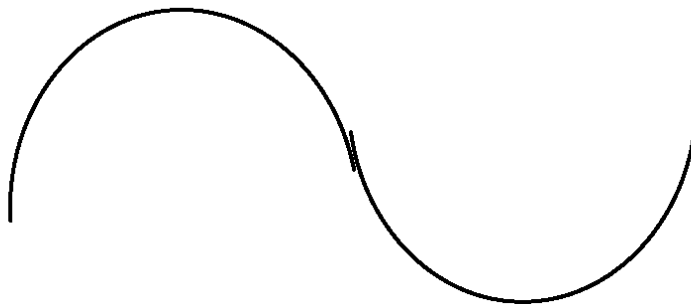


Рисунок 2.10 – Геометрія лопаті ротора Савоніуса

Робота вітряка Савоніуса заснована на аеродинамічному моменті, що виникає внаслідок відхилення потоку на лопатях. Коли вітер дме над машиною, повітря буде затримуватися на увігнутій стороні крильчатки, зверненої до вхідного вітру, що призведе до підвищення тиску. У той час як на опуклій стороні крильчатки, зверненій до вітру, повітря відхиляється від неї, таким

чином знижуючи тиск, рис. 2.11, ця різниця тиску на протилежних сторонах осі змушує ротор обертатися.

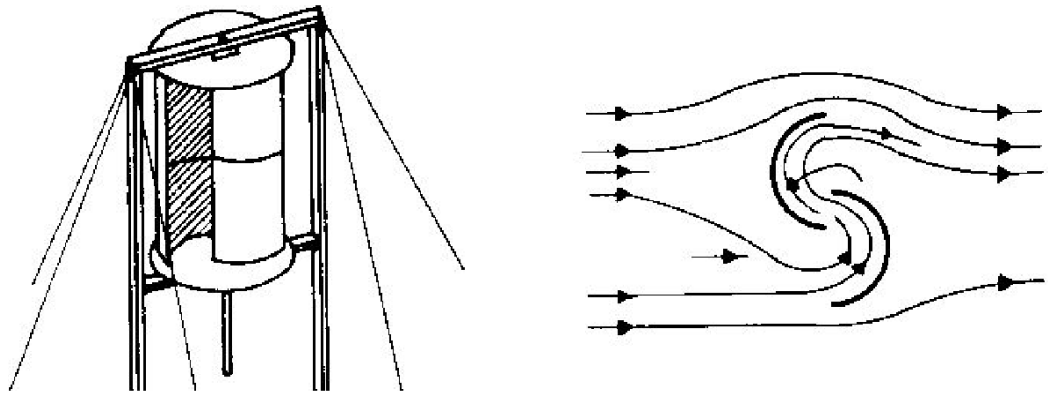


Рисунок 2.11 – Потік повітря навколо вітрогенератора Савоніуса

В даному випадку вирішено обрати саме цей тип турбін з наступних причин:

1. Він простий у конструкції, тому його можна побудувати, використовуючи наявні навички майстерні та матеріали з місцевого ринку.
2. Опорна вежа відносно проста.
3. Вона має відносно низьку вартість будівництва
4. Високий пусковий момент турбіни підходить для приводу насоса.
5. Турбіна Савоніуса, як і інші машини з вертикальною віссю, завжди повернута до вітру, що виключає необхідність переорієнтації.

Машина має наступний недолік:

1. Низький ККД.
2. Висока масивність.
3. Вона не захищена від шторму без зупинки пристрою.

Переваги Савоніуса можуть переважити низьку ефективність ротора і зробити його ідеальним економічним джерелом для задоволення невеликих потреб в енергії. Перекачування води в сільській місцевості є прикладом таких вимог до потужності, де простота виготовлення і фінансові можливості є основними критеріями.

2.4 Удосконалення конструкції ротора Савоніуса

2.4.1 Модернізація турбіни

Традиційна конструкція ротора Савоніуса в основному складається з двох половин циліндрів, що утворюють форму, показану на рис. 2.12. Зазвичай він виготовляється шляхом розрізання барабана або циліндра навпіл уздовж. Через центральну площину встановлюється вал, який утворює вертикальну вісь. Перевага такої конструкції полягає в тому, що її можна просто виготовити шляхом розрізання циліндрів, але її ККД є низьким порівняно з турбіною Дар'є або високошвидкісними пропелерними турбінами. Його ККД коливається від 12 до 15% ([16]). Цей ККД може бути подібним до ККД низькошвидкісних багатолопатевого турбін, рис. 2.13.

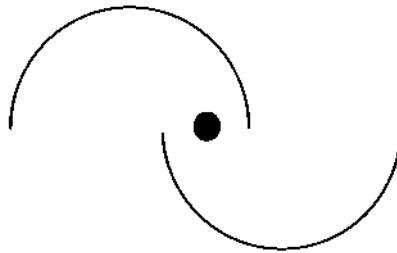


Рисунок 2.12 - Традиційна конструкція турбіни Савоніуса

Ротор визначається наступними параметрами:

1. a - розмір зазору між лопатями
2. b - нахлест лопаті на лопать
3. D - діаметр валу
4. d - діаметр ротора
5. h - висота лопаті
6. $p + b$ - довжина прямої ділянки
7. q - радіус ділянки по дузі окружності
8. θ - кут дуги окружності лопаті

Геометрія лопаті та пов'язані з нею параметри показані на рис. 2.13. Аеродинамічні характеристики вітрогенератора Савоніуса значною мірою

залежать від цих конструктивних параметрів.

Деякі дослідники працювали над конфігураціями лопатей ротора Савоніуса. Повідомлялося про різні оптимальні співвідношення перекриття лопатей ротора Савоніуса. Purwadi та інші спроектували ротор Савоніуса з перекриттям лопатей 2-2 і виявили, що при 40% перекритті лопатей ротор має кращу продуктивність, ніж при інших перекриттях [17]. Результати роботи Herath показують, що максимальний крутний момент і потужність ротора Савоніуса були отримані при перекритті 50%. Також автори Ushiyama і Nagai дійшли висновку, що ковші напівкруглого перерізу роторів Савоніуса мають оптимальну продуктивність при коефіцієнті перекриття між 20 ~ 30 %. [18].

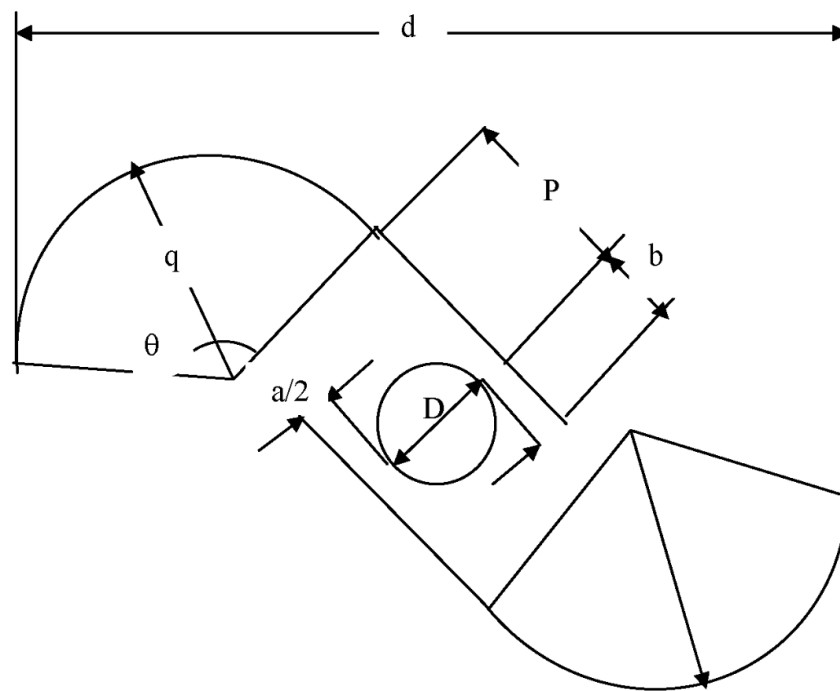


Рисунок 2.13 - Геометрія ротора Савоніуса

2.4.2 Оптимальні параметри вітрогенератора

Автори [17,18] провели дослідження з оптимізації різних параметрів ротора Савоніуса і стверджують, що вони досягли максимального коефіцієнта потужності 0,32 при коефіцієнті швидкості обертання кінчика лопаті 0,79. Ці параметри представлені в безрозмірному вигляді:

1. $a = 0$

Це зроблено для того, щоб видалити простір, який традиційно існує між лопатями і центральним валом.

$$2. \quad h/d = 0,77$$

Це означає, що вітряк має більшу ширину, ніж висоту.

$$3. \quad b = 0$$

Лопаті прикріплені до валу без перевищення.

$$4. \quad p/q = 0,2$$

$$5. \quad \theta = 1350$$

$$6. \quad d/\text{диск} = 0,75$$

Пізніші дослідження показали, що оптимальне співвідношення розмірів зазору дорівнює $1/6$, а не нулю, як в роботі Моді і Фернандо [19].

Також дослідження Моді і Фернандо для співвідношення сторін не охоплює значення співвідношень сторін один і більше, тобто вітроколеса більшої ширини не випробовувалися, більше того, за максимумом C_p , що спостерігається для співвідношення $0,77$, слідує лише одне значення меншого C_p для співвідношення $0,9$ [19].

На рисунку 2.14 показано інший тип ротора Савоніуса, в якому вал не розширюється, щоб пройти через зазор між лопатями. У цій конструкції частина повітря відхиляється другою лопаттю, оскільки існує перша [19]. Цей тип не такий міцний, як традиційний.

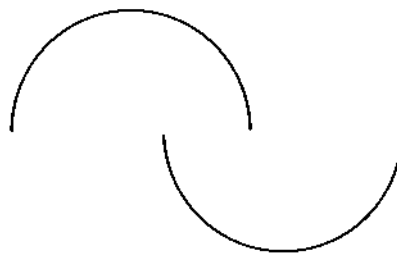


Рисунок 2.14 - Ротор Савоніуса без центрального валу

Розвитком цієї конструкції (рис. 2.14) є інший тип, показаний на рисунку 2.15. У цьому типі на додаток до переваги подвійного відхилення повітря, лопаті також діють частково як повітряна фольга, створюючи невеликий ефект підйомної сили.

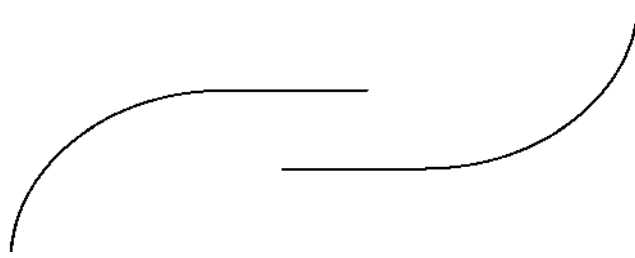


Рисунок 2.15 - Модифікований ротор Савоніуса з нецентральним валом

Проблема "мертвої точки", тобто точки, в якій ротор не звернений до вітру, яку ротор має через кожні 180 градусів, вирішується шляхом виконання роторів вітрогенератора поетапно.

Ротор, який виробляється двома фінськими компаніями, Shield Oy і Windside Production Ltd, є розвитком цього методу. У конструкції барабани ротора Савоніуса перетворилися на спіралеподібні лопаті. Вони більш ефективні, ніж звичайна машина Савоніуса, і чинять менше навантаження на свої опорні конструкції.

Спіральні лопаті в цьому роторі завжди спрямовані до вітру під прямим кутом. Ротор з боку вітру показаний на рисунку 2.16.

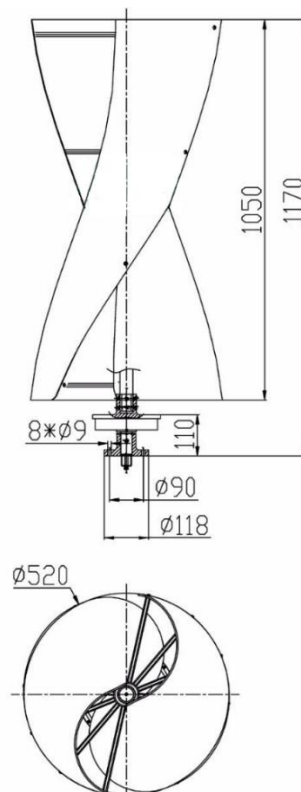


Рисунок 2.16 - Модель промислового вітроколеса

2.5 Висновки до розділу

1. Наведено теоретичні основи розрахунку вітроенергетичних установок. Визначено фактори, які впливають на генеровану потужність. Розкрито такі питання як підйомна сила і сила опору, потужність вітру, енергія вітру, коефіцієнт крутного моменту, коефіцієнт швидкості кінчика лопаті, механічна сила, ефективність перетворення енергії.

2. На основі проведеного аналізу конструкцій відомих вертикально-осьових вітрогенераторів, запропоновано удосконалити проектовану конструкцію. Наведено основні параметри вітротурбіни та встановлено їх значення, при яких ефективність перетворення енергії вітру є найвищою.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Особливості проектування

Мета цього розділу - запропонувати належну конструкцію ротора Савоніуса з урахуванням наступних критеріїв:

1. Це має бути машина з самозапуском.
2. Ротор може бути виготовлений з місцевих матеріалів.
3. Конструкція повинна бути максимально простою у виготовленні, щоб її можна було виготовити на місці.
4. Конструкція повинна бути простою в експлуатації та обслуговуванні, щоб її могла обслуговувати некваліфікована людина.
5. Вібрації через рух турбіни повинні бути мінімізовані, а система повинна підтримуватися простою вежею.
6. Задовольнити вимоги безпеки.

3.2 Вимоги до конструкції

Було вирішено базувати проект на оптимізації, запропонованій Моді та Фернандо [19] з наступних причин:

1. Критерії Моді і Фернандо охоплювали всі геометричні параметри ротора разом, в той час як інші дослідження стосувалися одного з параметрів.
2. Їх результати були підтверджені пізнішими дослідженнями, за винятком розміру зазору між лопатями (який виявився рівним $1/6$, а не нулю) і співвідношення сторін, яке не доведено для іншого значення) [19]. Ці два параметри були проігноровані для наступних розрахунків:

(1) Відсутність зазору між лопатями в конструкції, що дає можливість закріпити лопаті разом з валом.

(2) Максимальний коефіцієнт потужності для співвідношення сторін $0,77$, за даними авторів, становить $0,235$, що є задовільним у нашому випадку.

3. Конструкція проста у виготовленні порівняно зі складними конструкціями, такими як конструкція з навітряного боку.

3.3 Конструкція вітротурбіни

3.3.1 Конструкція ротора

Згідно з попереднім завданням, проектні параметри є такими:

$$\left\{ \begin{array}{l} a / d = 0 \\ b / d = 0 \\ h / d = 0,77 \\ p / q = 0,20 \\ \theta = 135^\circ \\ d / d_{disc} = 0,75 \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Потужність, що видається турбіною, становить

$$P = 0,5 C_p \rho V^3 A \quad (3.2)$$

Моді і Фернандо [19] стверджують, що максимальний коефіцієнт потужності $C_p = 0,32$ при коефіцієнті швидкості кінчика лопаті 0,79. Це значення наведено для необмежених умов. Значення 0,235 для обмежених умов (з урахуванням коефіцієнта блокування), що ближче до умов міського середовища. [19]. Очікується, що це значення для моделі буде меншим за це значення через місцеві умови виробництва.

Приймаємо $C_p = 0,225$;

$$\rho = 1,14 \text{ кг/м}^3;$$

$$v = 4,2 \text{ м/с.}$$

$$P = 0,5 \cdot 0,225 \cdot 1,14 \cdot (4,2)^3 \cdot A,$$

$$P = 9,5A, \quad (3.3)$$

де A - площа ротора (м)

Припустимо, що:

1. Необхідно використовувати вітрогенератор для живлення насоса, щоб задовольнити потреби групи з 25 сімей, середній розмір сім'ї яких становить чотири особи.
2. Напір насоса, як у базовому проекті - 10,0 м
3. Густина води - 1000 кг/м³
4. Коефіцієнт корисної дії насоса (η_p) - 0,6
5. Коефіцієнт корисної дії трансмісії (η_{tra}) - 0,73
6. Система працює цілий день.

Вихідна потужність насоса становить:

$$P_{out} = \rho_w g H Q$$

де ρ_w - густина води (кг/м³);

g - гравітаційне прискорення (м/с²);

Q - витрата води (м/с);

H - напір води.

Таблиця 3.1 показує добове споживання води.

Таблиця 3.1 - Добове споживання води

Тип	Число	Споживання (л/особу)	Загальне споживання (л/добу)
Люди	100	61,6	6160

Загальне споживання/добу - 6160 л = 6,16 м³

Враховуючи необхідний скид - 7,0 м /добу

Підставимо в рівняння 3.4

$$P_{out} = \frac{10^3 \cdot 9,81 \cdot 7 \cdot 10}{24 \cdot 3600} = 7,95 \text{ Вт} \quad (3.4)$$

Потужність, необхідна для насоса:

$$P_p = P_{out} / \eta_p \quad (3.5)$$

Потужність ротора:

$$P_r = \frac{P_{out}}{(\eta_{tra} \cdot \eta_p)} \quad (3.6)$$

Отже:

$$P_r = \frac{7,95}{(0,73 \cdot 0,6)} = 18,15 Bm$$

Прирівнюючи до рівняння 3.3

$$9,5A = 18,15$$

Необхідна площа ротора:

$$A = 18,5/9,5 = 1,9 \text{ м}^2$$

$$A \sim 2,0 \text{ м}^2$$

Виконаємо турбіну з двохрівневих роторів площею $A/2$ кожен, встановлених під прямим кутом один до одного. див. рис. 3.1.

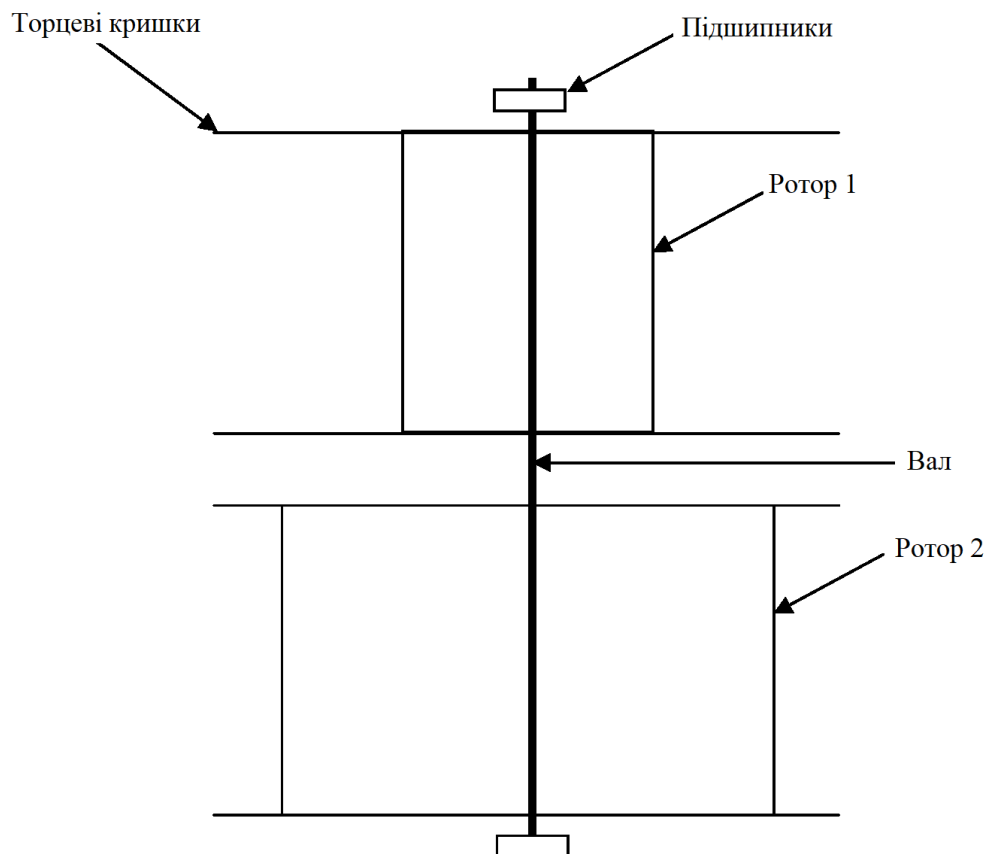


Рисунок 3.1 – Дворівневий ротор Савоніуса

Площа проекції ротора $A_r = 2,0/2 = 1,0 \text{ м}^2$

$$A_r = hd \quad (3.7)$$

З рівняння 3.1 $h = 0,77d$

Підставимо в (3.7):

$$h_d = 0,77d^2$$

$$d = 1,14$$

$$h = 1,14 \cdot 0,77 = 0,8778 \text{ м}$$

$$h = 0,88 \text{ м}$$

$$d_{disc} = d / 0,75 = 1,14 / 0,75 = 1,481 \text{ м}$$

Для розміру листа сталі d_{disc} , що дорівнює 1,2 м, вибираємо радіус ковша = 0,3 м. З рівняння (3.1):

$$p = 0,2q$$

$$p = 0,2 \cdot 0,3 = 0,06 \text{ м}$$

Таблиця 3.2 - Розміри ротора

Параметр	Розмір
Діаметр ротора	1,14 м
Висота ротора	0,88 м
Радіус ковша	0,305 м
Кут дуги ковша	135°
Діаметр дискової пластини	1,20 м
Розмір зазору між ножами	0,00 м
Перекриття лопаті на вильоті	0,00 м
Довжина прямої ділянки	0,06 м

Спроекований ротор показано на рисунках 3.2 та 3.3.

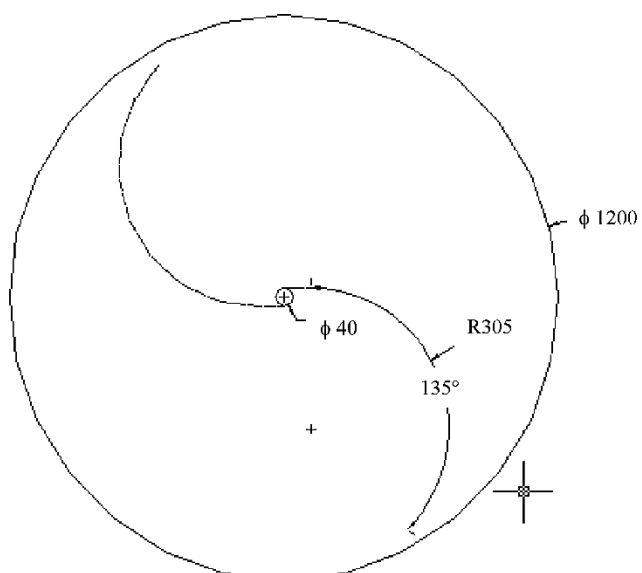


Рисунок 3.2 - Конфігурація ротора

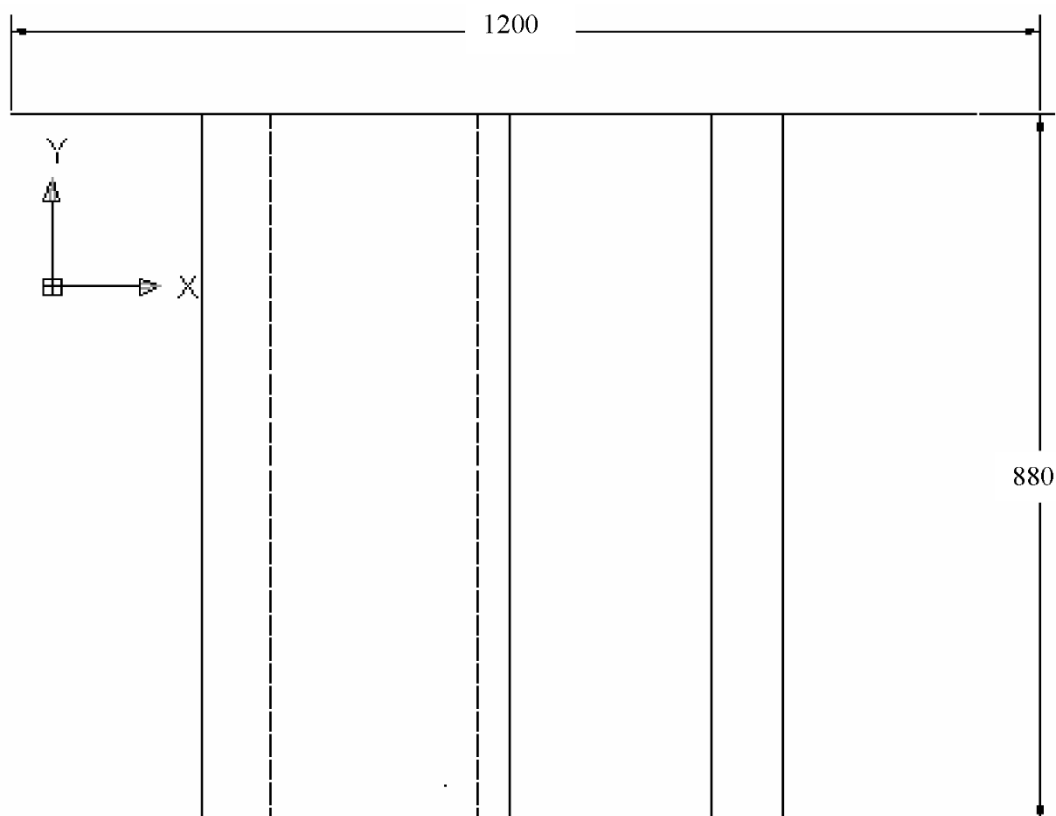


Рисунок 3.3 - Розрахунковий ротор

3.3.2 Розрахунок валу

Вибраний матеріал валу:

Вуглецева сталь AISI 1010 з наступними властивостями:

Межа міцності 385 МПа

Межа текучості 225 МПа

Робоче напруження зсуву 55 МПа

Розрахунок зусилля на валу.

Враховуючи шторми, припустимо, що розрахунок базується на швидкості вітру 15 м/с. Сила, що виділяється вітром:

$$F = \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (3.8)$$

Підставимо замість:

Густина повітря $\rho = 1,14 \text{ кг/м}^3$ (середнє значення)

Площа охоплення ротора $A = 1,0 \text{ м}^2$

$$F = \frac{1}{2} \cdot 1,14 \cdot 1,0 \cdot 15^2 = 128,25 \text{ Н}$$

Крутний момент

$$T = F \cdot d / 2$$

$$T = (128,25 \cdot 1,14) / 2 \quad (3.9)$$

$$T = 73,1 \text{ Н.м}$$

Згинальний момент:

Сили на валу показані на рисунку 3.4.

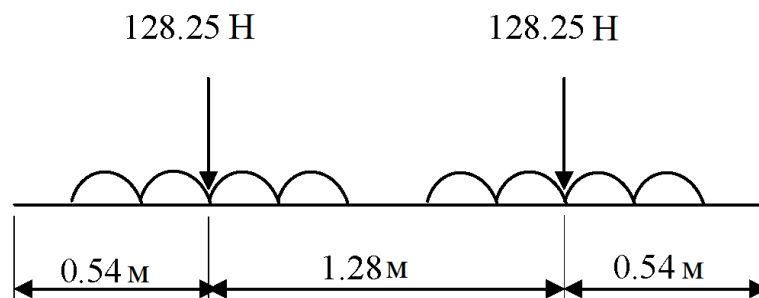


Рисунок 3.4 – Сили, які діють на вал ротора

З рисунку 3.3:

$$R_1 + R_2 = 128,25 = 256,5 \text{ Н} \quad (3.10)$$

З симетрії:

$$R_1 = R_2 = 128,25 \text{ Н} \quad (3.11)$$

Згинальний момент

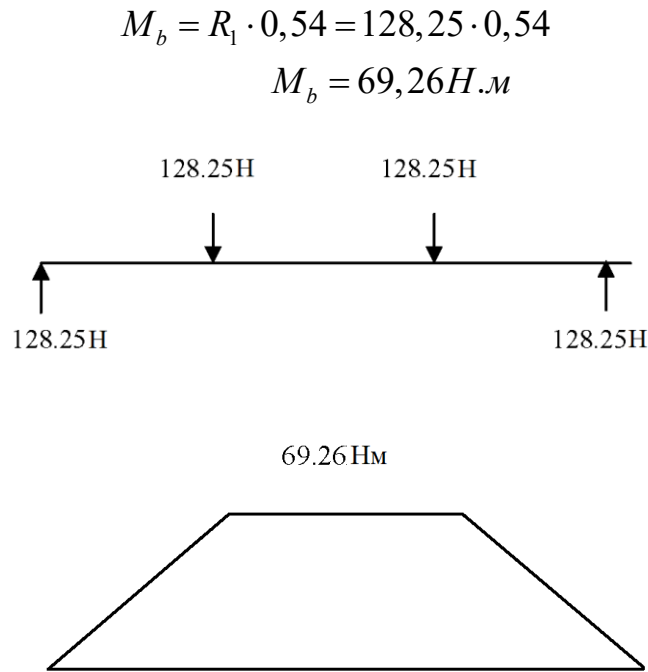


Рисунок 3.5 - Епюра згинальних моментів на валу ротора

Діаметр валу:

З рівняння коду ASME для порожнистого валу для комбінованого згину на кручення та осьових навантажень.

$$d_0^3 = \frac{16}{\pi \tau (1 - k^4)} \sqrt{(C_b M_b)^2 + (C_t T)^2} \quad (3.12)$$

де

$$K = \frac{d_i}{d_o} \quad (3.13)$$

d_o - зовнішній діаметр валу (м);

d_i - внутрішній діаметр валу (м);

C_b - комбінований ударний і втомний коефіцієнт (згинальний момент);

C_t - комбінований ударний і втомний фактор (момент кручення).

(Для $K = 0,9$, $C_t = 1,5$, $C_b = 1$)

Підставляючи в рівняння (3.12)

$$d_0^3 = \frac{16}{(1 - 0,9^4) \pi \cdot 10^6} \sqrt{(69,26)^2 + (1,5 \cdot 73)^2}$$

$$d_0 = 0,033 \text{ м} = 33 \text{ мм}$$

В якості валу використовується сталеві труба із зовнішнім діаметром 42

мм і внутрішнім діаметром 37 мм, яка масово виготовляється і найбільш наближена по діаметру.

Навантаження та крутний момент валу, що використовується:

З рівняння 3.9: $T = 0,57F$

З рисунку 3.5: $M_b = 0,54F$

Підставляємо в (3.12)

$$(0,042)^3 = \frac{16}{(1 - 0,9^4)\pi \cdot 55 \cdot 10^6} \sqrt{(0,54F)^2 + (1,5 \cdot 0,57F)^2}$$

$$F = 272 \text{ Н}$$

$$T = 0,57 \cdot 272 = 155 \text{ Н.м}$$

3.3.3 Розрахунок підшипників

$$C = \left[\frac{60 N l P_r^3}{10^6} \right] \quad (3.14)$$

де C - динамічна вантажопідйомність (Н);

N - частота обертання валу (об/хв);

l - термін служби підшипника (год);

P_r - радіальне навантаження (Н).

Еквівалентне радіальне навантаження:

$$P_e = C_1 (X V_1 F_r + Y F_a)^{[29]} \quad (3.15)$$

де F_r - радіальна складова навантаження (Н);

F_a - осьова складова навантаження (Н);

X - радіальний фактор;

Y - осьовий фактор;

V_1 - коефіцієнт обертання;

C_1 - коефіцієнт обертання $V_1 = 1$.

Для легкого удару $C_1 = 1,5$

$X = 0,56$ $Y = 2,13$

Приймаючи відношення швидкостей кінчика лопаті λ рівним 1,2

$$N = \frac{\lambda \cdot V}{\pi D} \cdot 60 = \frac{1,2 \cdot 4,2}{\pi \cdot 1,14} = 84,4 \text{ об / хв}$$

Припускаємо, що підшипник працює один рік

Час роботи:

$$l = 365 \cdot 24;$$

$$l = 8760 \text{ год};$$

Маса ротора = 15 кг ;

$$F_a = 2 \cdot 15 \cdot 9,81 ;$$

Складаємо рівняння (3.15)

$$P_e = 1,5(0,56 \cdot 128,25 + 2,13 \cdot 294,3) = 1048 H$$

З рівняння (3.14)

$$C = (60 \cdot 84,4 \cdot 8760 \cdot 1048^3 \cdot 10^{-6})^{1/3} = 3710 H$$

Використаний підшипник:

Підшипник 1208

Динамічне навантаження - 15 кН

Статичне навантаження - 8,7 кН

Отвір - 40 мм

Зовнішній діаметр - 80 мм

Ширина - 0,18 мм

3.3.4 Конструкція рами вежі

Вежа спроектована у вигляді рами прямокутної форми, виготовленої зі сталевих труб діаметром 31 мм і 37 мм і товщиною 1,5 мм. Розміри рами були обрані таким чином, щоб ротори могли бути зібрані всередині неї. Труби діаметром 37 мм для чотирьох стійок і 31 мм для тушкування. Рама показана на рис. (5.6)

Розміри рами наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Розміри рами

Висота	5 м
Ширина	1,8м
Довжина	1,8 м

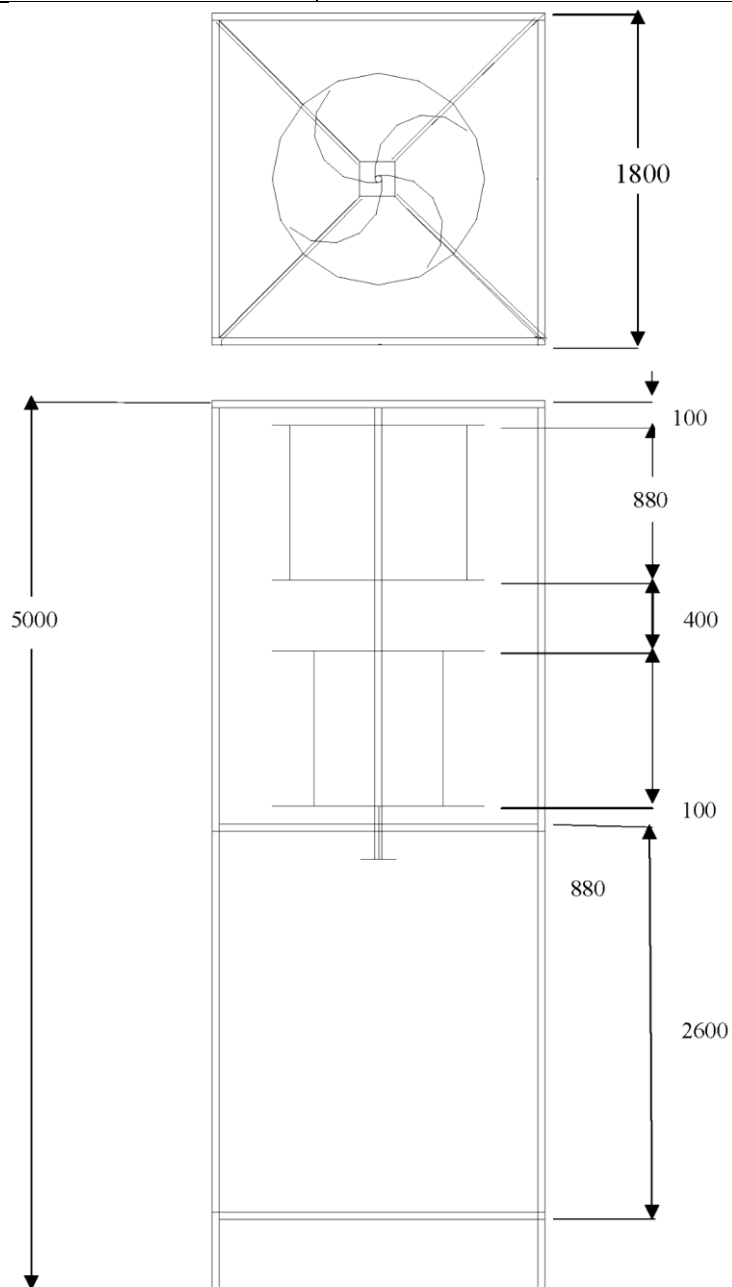


Рисунок 3.5 - Рама та ротори

Процес виготовлення та встановлення

1. Ротори (рис. 3.6)

Ротори можна виготовити зі сталевих листів товщиною 1 мм. Кожен

ротор складається з:

- Лопаті

Їх можна вирізати з двох листів розміром 220 мм_х 800 мм і згорнути в циліндричну форму під кутом 135° . Два кінці листа шириною 20 мм зігнути під кутом 90° і приклепати до торцевих заглушок.

- Торцеві заглушки - це два диски діаметром 1200 мм, які утримують лопаті на місці. У центрах дисків зробити отвори діаметром 40 мм для проходження валу.

2. Вал і підшипники

Рекомендується використати вал діаметром 42 мм, а два кінці валу обробити на токарному верстаті до діаметру 40 мм для підшипникового вузла.

3. Рама та опора

Труби з низьковуглецевої сталі діаметром 37 мм і товщиною 1,5 мм потрібно нарізати до необхідних розмірів і зварити для формування вежі. Кутники 50 мм_х 50 мм використовуються для формування хрестовини, на якій встановлюються верхнє та нижнє гнізда підшипників.

Нижній підшипник встановлюють на своє гніздо, а ротори були поміщаються всередину рами. Вал слід просунути зверху через ротори і встановити в нижній підшипник. Потім встановити верхній підшипник. У даній установці рекомендується до встановлення ручна гальмівна система з двох половинок циліндрів, які приводилися в дію двома гвинтовими болтами для зупинки обертання валу. Ротори приклепуються до валу на відстані 100 мм від найближчого підшипника і 400 мм один від одного.

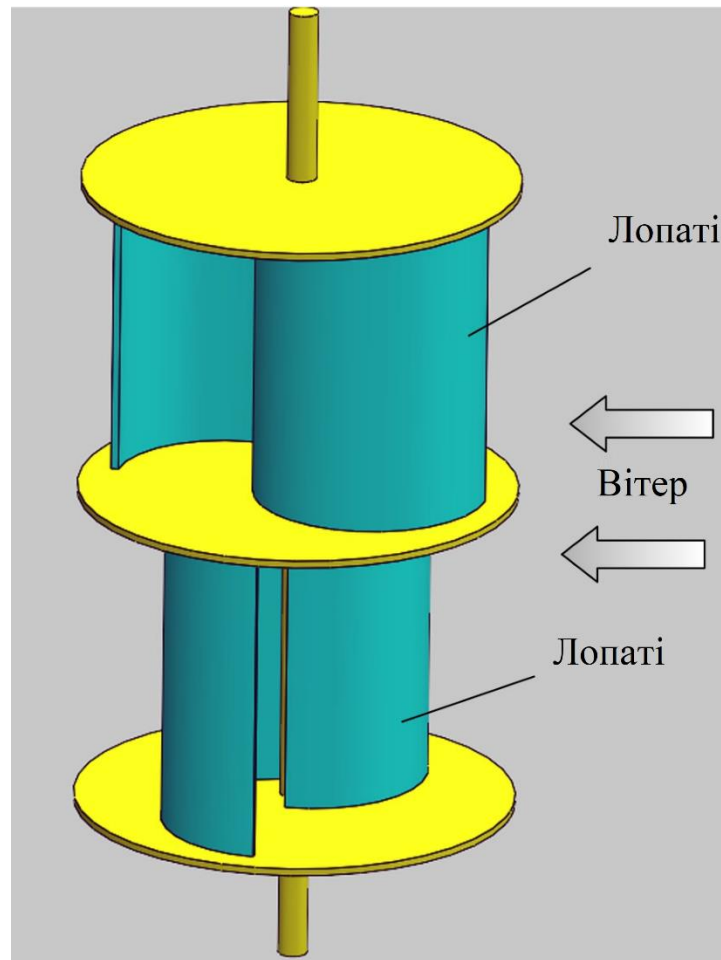


Рисунок 3.6 - Збірка роторів

На нижньому кінці валу встановлюють шків діаметром 200 мм для передачі крутного моменту. Для вимірювання крутного моменту на гнізді, що збігається з шківом, встановлюються два пружинні балансири. Один з пружинних балансирів закріплений на повзунку, що переміщується за допомогою гвинтового болта для додавання натягу ремня, який проходить через шків і закріплений з його кінців на двох пружинних балансирах. Див. рис. 3.8. З чотирьох боків рама слід закріпити розтяжками. Вітряк запропонованої конструкції зображено на рис. 3.9.

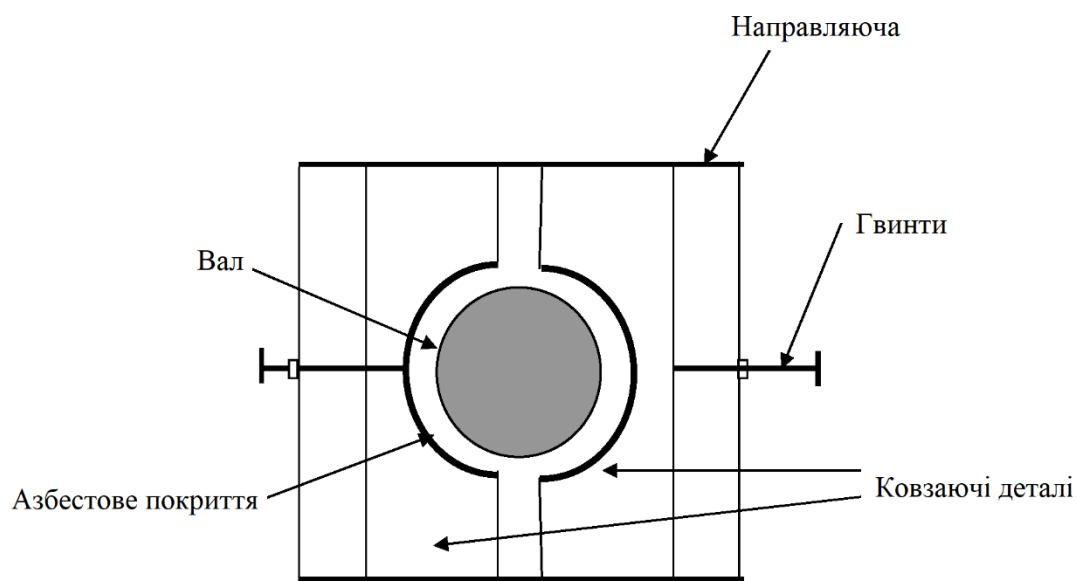


Рисунок 3.7 - Гальмівна система



Рисунок 3.8 - Система вимірювання крутного моменту



Рисунок 3.9 - Вітроустановка в зборі

3.4 Випробування продуктивності

3.4.1 Засоби вимірювання для випробування

1. Чашковий анемометр для вимірювання швидкості вітру, закріплений на відстані 2,4 м від центру машини на рівні 2,5 м над основою рами вежі, рис. 3.10.
2. Пружинні ваги для вимірювання крутного моменту рисунок 3.11.
3. Тахометр для вимірювання швидкості обертання ротора.



Рисунок 3.10 - Чашковий анеометр

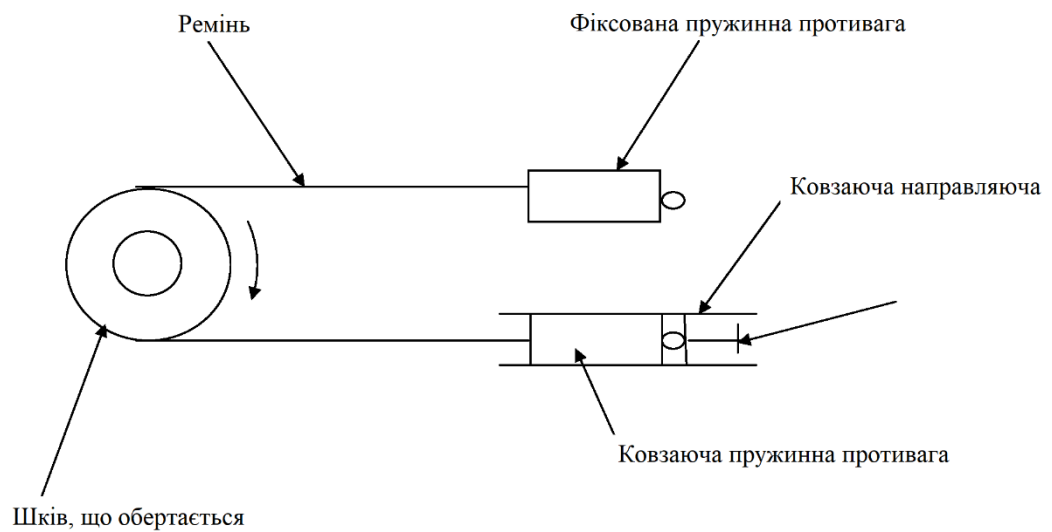


Рисунок 3.11 - Система вимірювання крутного моменту

3.4.2 Методика випробування

Визначення вихідної потужності

Для визначення вихідної потужності турбіни для різних значень швидкості вітру було знято гальмо і турбіні дозволили почати обертання. До турбіни було прикладено навантаження, потягнувши за пружинний баланс (рис.

3.11). Коли швидкість вітру залишалася стабільною на одному значенні, швидкість вітру вимірювалася і записувалася, а швидкість обертання валу і сила пружинної рівноваги записувалися в залежності від значення швидкості вітру. Випробування повторювали для різних значень швидкості вітру. Процедура повторювалася кілька разів.

Випробування при постійній швидкості вітру

Метою цієї частини випробування є оцінка експлуатаційних характеристик машини. Оскільки швидкість вітру неможливо контролювати і підтримувати постійну величину, як в лабораторних умовах, тест мав на меті лише дати оцінку для найкращих умов роботи машини з меншою очікуваною точністю. Випробування проводилося при швидкості вітру 5 м/с. Для визначення продуктивності турбіни [21] при постійній швидкості вітру до неї прикладали навантаження і спостерігали за показаннями анемометра до досягнення швидкості вітру 5 м/с, записували показання пружинного балансу і тахометра. Навантаження поступово збільшували і повторювали випробування для різних значень навантаження.

3.4.3 Отримані дані

При повторенні тесту нелогічні показання, які були спричинені швидкою зміною швидкості вітру під час зчитування, були проігноровані, і остаточні показання тесту наведені в наступних таблицях:

Таблиця 3.3 - Перше випробування ($F_1 = 4,905 \text{ Н}$, $F_2 = 19,62 \text{ Н}$)

Швидкість вітру (м/с)	3,0	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0	5,3	5,5	6	6,3	6,5	7	7,5	8,0	9,0
Частота обертання турбіни (об/хв)	30	49	60	69	74	78	88	90	92	92	112	114	120	128	148

Таблиця 3.4 - Друге випробування ($F_1 = 24,525 \text{ Н}$, $F_2 = 53,955 \text{ Н}$)

Швидкість вітру (м/с)	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Частота обертання турбіни (об/хв)	40	70	92	120	138	156

Таблиця 3.5 - Третє випробування ($F_1 = 4,905 \text{ Н}$, $F_2 = 44,145 \text{ Н}$)

Швидкість вітру (м/с)	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Частота обертання турбіни (об/хв)	30	60	80	104	126

Таблиця 3.6 - Четверте випробування ($F_1 = 49,05 \text{ Н}$, $F_2 = 93,195 \text{ Н}$)

Швидкість вітру (м/с)	4,0	5,0	5,5	6,5	7,0	8,0	9,0
Частота обертання турбіни (об/хв)	26	55	70	90	100	120	140

Таблиця 3.7 – П'ять випробування (постійна швидкість вітру = 5,0 м/с)

F ₁ (кг)	F ₂ (кг)	N (об/хв)
1,5	2,5	90
0,9	2	84
0,5	1,8	78
1,8	3,5	76
1	3	70
2	4	70
2,5	5	62
3	6	62

3.4.4 Результати розрахунків

Вхідна потужність:

$$P_i = 0,5 \rho A v^3$$

$$A = 2hd$$

$$A = 2 \cdot 0,88 \cdot 1,14 \cdot 1,0032 \text{ м}^2 = 2,0 \text{ м}^2$$

ρ - густина повітря, прийнята рівною 1,14 кг/м³

$$P_i = 0,5 \cdot 1,14 \cdot 2,0 \cdot v^3$$

$$P_i = 1,14 v^3 \quad (3.16)$$

Різниця балансу пружин:

$$\Delta F = F_1 - F_2$$

Крутний момент:

$$T = \Delta F d_1 / 2$$

де d_1 - діаметр шківів = 0,19 м

$$T = \Delta F \cdot 0,19 / 2$$

$$T = 0,095 \Delta F \quad (3.17)$$

Вихідна потужність:

$$\begin{aligned}
 P_o &= 2 \cdot \pi \cdot NT / 60 = \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot N \cdot (0,095\Delta F) / 60 \\
 P_o &= 0,00995(N\Delta F)
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Коефіцієнт потужності:

$$C_p = P_o / P_i \tag{3.19}$$

Крутний момент:

$$\begin{aligned}
 C_T &= T / (0,5\rho Av^3) \\
 C_T &= T / (0,57v^3)
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{\pi \cdot dN}{60v} = \pi \cdot 1,14n / (60v) \\
 \lambda &= 0,05969N / v
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

Результати розрахунків наведено в наступних таблицях:

Таблиця 3.8 показує результати розрахунків для першого випробування (табл. 3.3). У таблиці (3.9) наведено результати розрахунків для другого випробування (табл. 3.4). У таблиці 3.10 наведено результати розрахунків для третього випробування (табл. 3.5). У таблиці 3.11 наведено результати розрахунків для другого випробування (табл. 3.6). У таблиці 3.12 наведено результати розрахунків для другого випробування (табл. 3.7)

Графіки результатів (дані з таблиць 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 і 3.12) показані на наступних рисунках:

На рисунку 3.12 показано залежність вихідної потужності від швидкості вітру для різних значень крутного моменту.

На рисунку 3.13 показано зміну коефіцієнта потужності від швидкості вітру для різних значень крутного моменту.

На рисунку 3.14 показано зміну частоти обертання турбіни від швидкості вітру для різних значень крутного моменту.

На рисунку 3.15 показано зміну коефіцієнта потужності від співвідношення швидкості обертання кінчика лопаті для різних значень крутного моменту.

На рисунку 3.16 показано зміну коефіцієнта крутного моменту від швидкості обертання турбіни.

На рисунку 3.17 показана крива залежності коефіцієнта потужності від частоти обертання кінчика лопаті при швидкості вітру 6,0 м/с.

На рисунку 3.18 показана крива залежності коефіцієнта крутного моменту від частоти обертання кінчика лопаті при швидкості вітру 5,0 м/с

Таблиця 3.8 - Крутний момент 2,8 Нм

v (м/с)	N (об/хв)	λ	P _i (Вт)	P _o (Вт)	C _p	T (Нм)	C _T
3	30	0,60	30,88	4,39	0,142	2,80	0,54
3,5	49	0,84	49,03	7,17	0,146	2,80	0,40
3,8	60	0,94	62,75	8,78	0,140	2,80	0,34
4	69	1,03	73,19	10,10	0,138	2,80	0,31
4,5	74	0,98	104,21	10,83	0,104	2,80	0,24
5	78	0,93	142,96	11,42	0,080	2,80	0,20
5,3	88	0,99	170,26	12,88	0,076	2,80	0,17
5,5	90	0,98	190,27	13,18	0,069	2,80	0,16
6	92	0,92	247,03	13,47	0,055	2,80	0,14
6,3	92	0,87	285,97	13,47	0,047	2,80	0,12
6,5	112	1,03	314,07	16,40	0,052	2,80	0,12
7	114	0,97	392,27	16,69	0,043	2,80	0,10
7,5	120	0,96	482,48	17,57	0,036	2,80	0,09
8	128	0,96	585,55	18,74	0,032	2,80	0,08
9	148	0,98	833,72	21,67	0,026	2,80	0,06

Таблица 3.9 - Крутящий момент 5,6 Нм

V (м/с)	N (об/хв)	λ	P _i (Вт)	P _o (Вт)	C _p	T (Нм)	C _T
4	40	0,60	73,2	11,7	0,160	5,6	0,61
5	70	0,84	143,0	20,5	0,143	5,6	0,39
6	92	0,92	247,0	26,9	0,109	5,6	0,27
7	120	1,02	392,3	35,1	0,090	5,6	0,20
8	138	1,03	585,5	40,4	0,069	5,6	0,15
9	156	1,03	833,7	45,7	0,055	5,6	0,12

Таблица 3.10 - Крутящий момент 7,46 Нм

V (м/с)	N (об/хв)	λ	P _i (Вт)	P _o (Вт)	C _p	T (Нм)	C _T
4	30	0,448	73,2	11,7	0,160	7,46	0,81
5	60	0,716	143,0	23,4	0,164	7,46	0,52
6	80	0,796	247,0	31,2	0,126	7,46	0,36
7	104	0,887	392,3	40,6	0,103	7,46	0,27
8	126	0,940	585,5	49,2	0,084	7,46	0,20

Таблиця 3.11 - Крутний момент 8,39 Нм

V (м/с)	N (об/хв)	λ	P _i (Вт)	P _o (Вт)	C _p	T (Нм)	C _T
4	26	0,388	73,2	11,4	0,156	8,39	0,92
5	55	0,657	143,0	24,2	0,169	8,39	0,59
5,5	70	0,760	190,3	30,7	0,162	8,39	0,48
6,5	90	0,826	314,1	39,5	0,126	8,39	0,35
7	100	0,853	392,3	43,9	0,112	8,39	0,30
8	120	0,895	585,5	52,7	0,090	8,39	0,23
9	140	0,929	833,7	61,5	0,074	8,39	0,18

Таблиця 3.12 - Результати випробувань при постійній швидкості вітру 5 м/с

V (м/с)	N (об/хв)	F ₁ (Н)	F ₂ (Н)	ΔF (Н)	λ	P _i (Вт)	P _o (Вт)	C _p	T	C _T
5	90	14,72	24,53	9,81	1,07	142,96	8,78	0,061	1,86	0,13
5	84	8,83	19,62	10,79	1,00	142,96	9,02	0,063	2,05	0,14
5	78	4,91	17,66	12,75	0,93	142,96	9,90	0,069	2,42	0,17
5	76	17,66	34,34	16,68	0,91	142,96	12,61	0,088	3,17	0,22
5	70	9,81	29,43	19,62	0,84	142,96	13,66	0,096	3,73	0,26
5	70	19,62	39,24	19,62	0,84	142,96	13,66	0,096	3,73	0,26
5	62	24,53	49,05	24,53	0,74	142,96	15,13	0,106	4,66	0,33
5	62	29,43	58,86	29,43	0,74	142,96	18,15	0,127	5,59	0,39

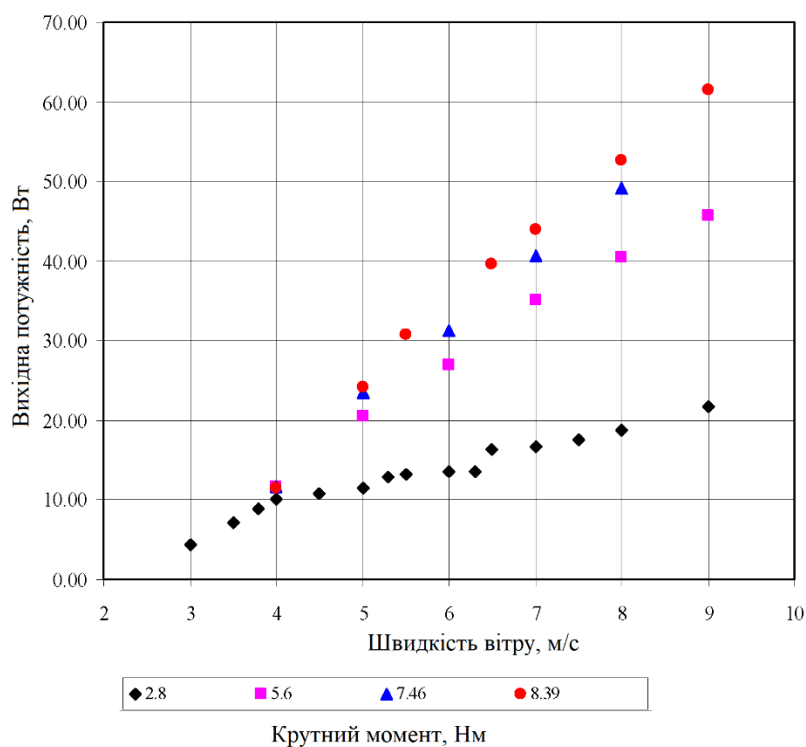


Рисунок 3.12 - Зміна вихідної потужності турбіни для різних значень крутного моменту

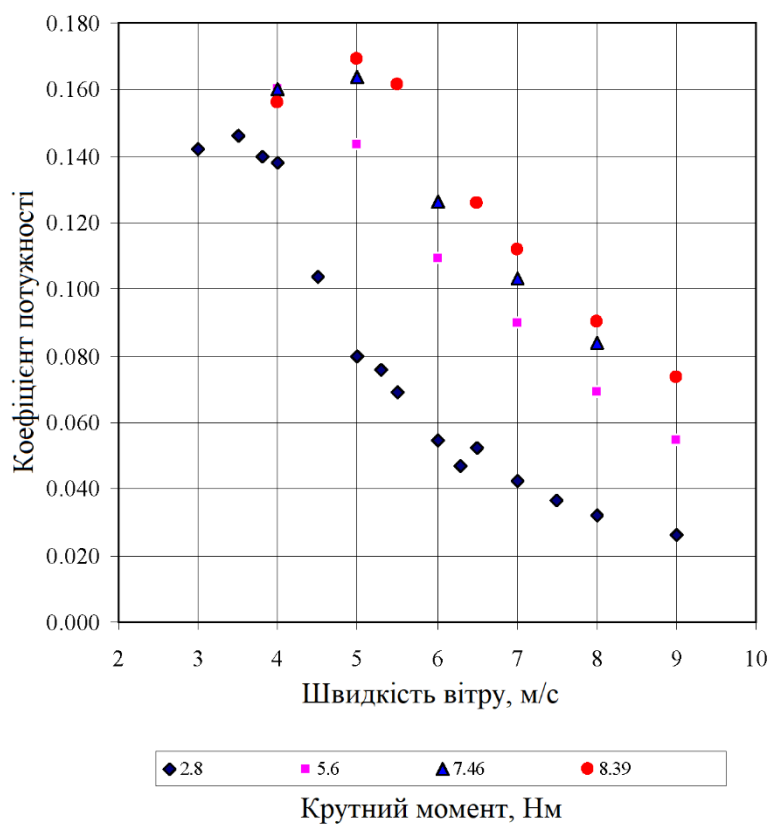


Рисунок 3.13 - Залежність коефіцієнта потужності від швидкості вітру для різних значень крутного моменту

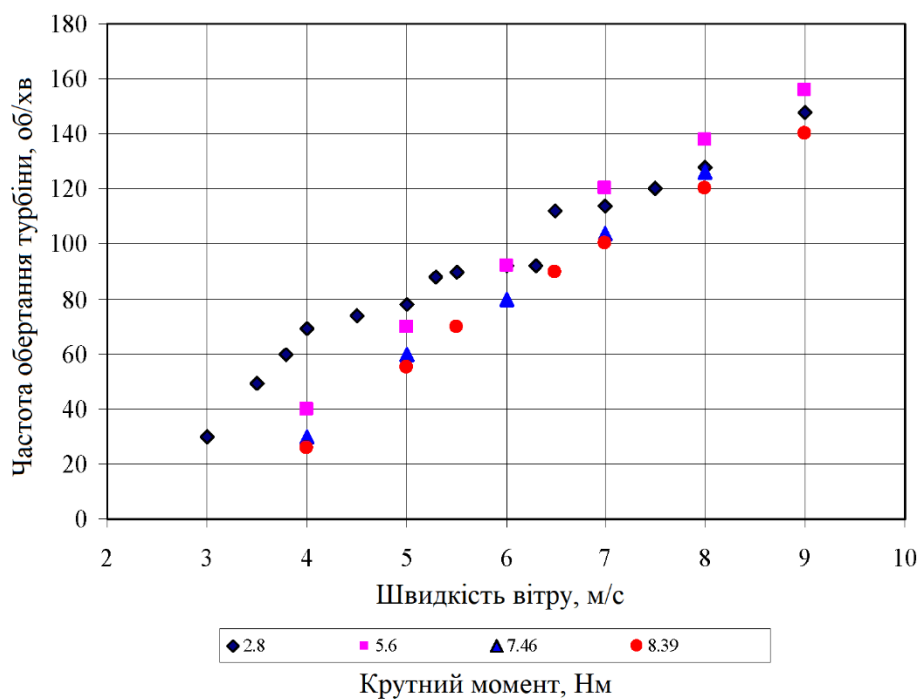


Рисунок 3.14 - Залежність частоти обертання турбіни від швидкості вітру для різних значень крутного моменту

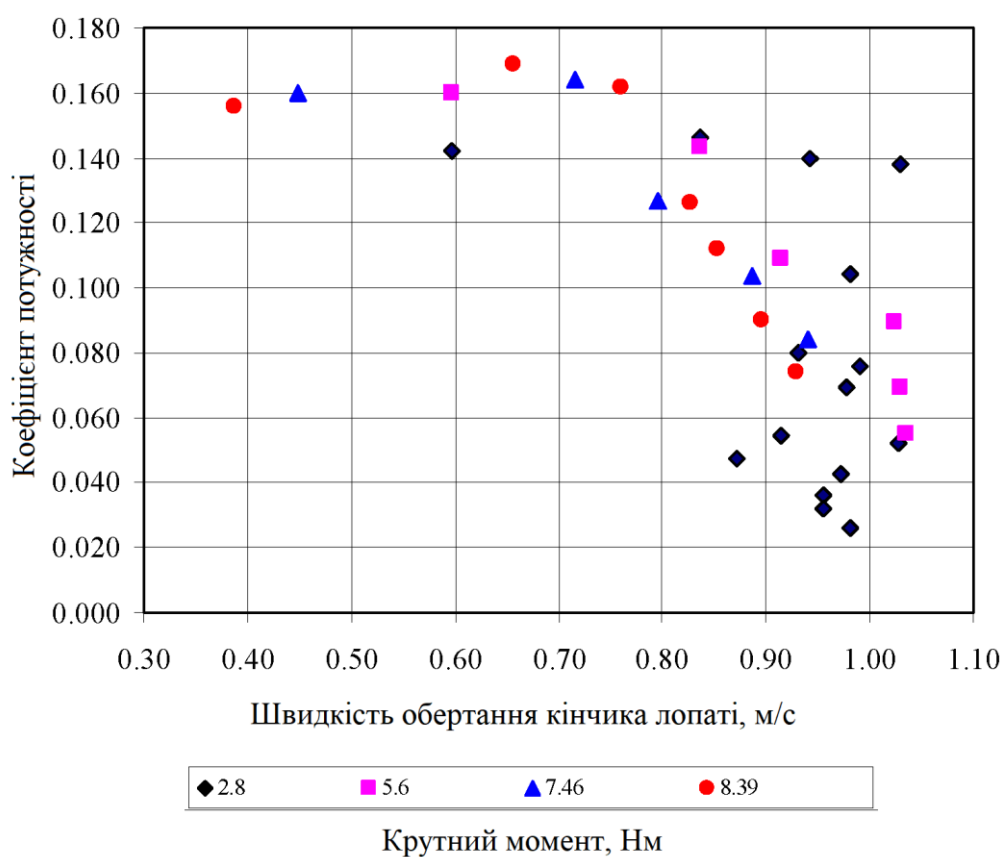


Рисунок 3.15 - Залежність коефіцієнта потужності від швидкості обертання кінчика лопаті для різних значень крутного моменту

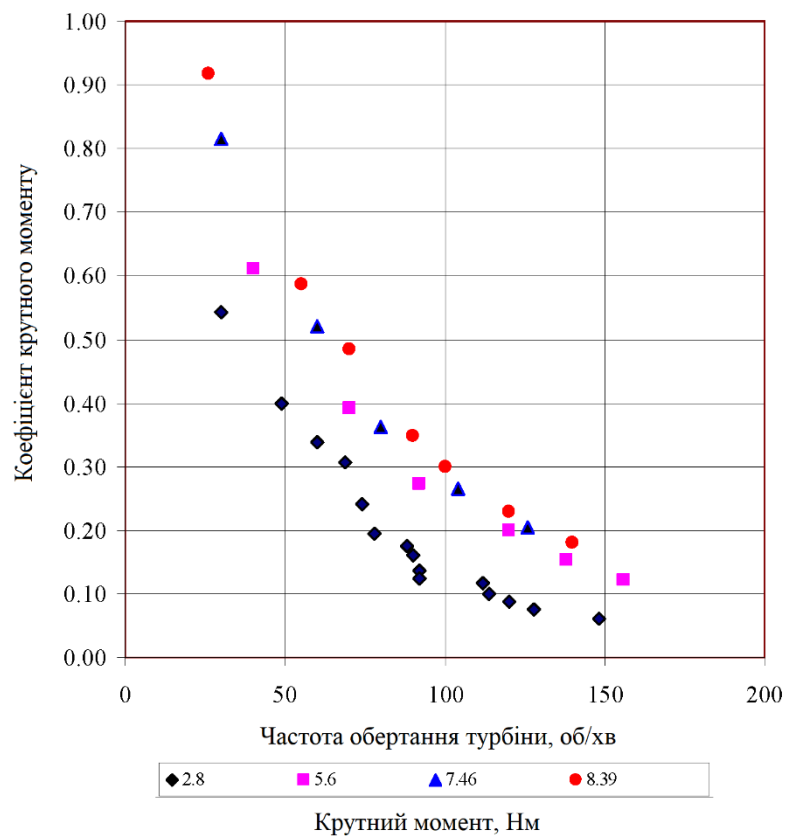


Рисунок 3.16 - Коефіцієнт крутного моменту в залежності від швидкості для різних значень крутного моменту

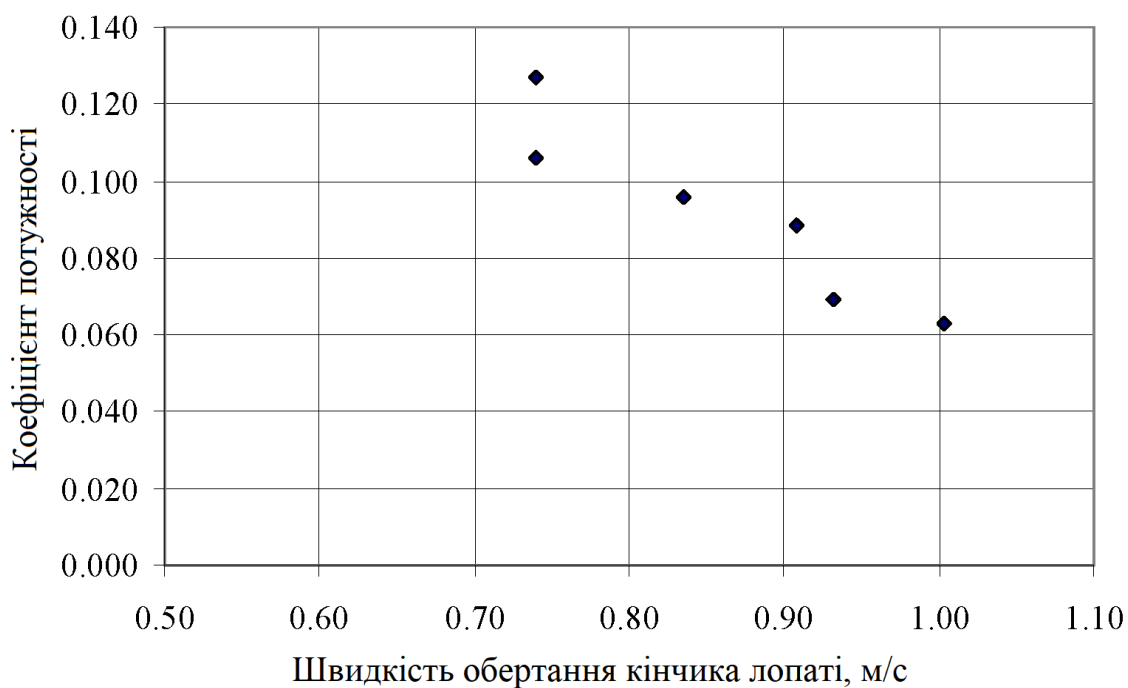


Рисунок 3.17 - Продуктивність турбіни при швидкості вітру 5 м/с

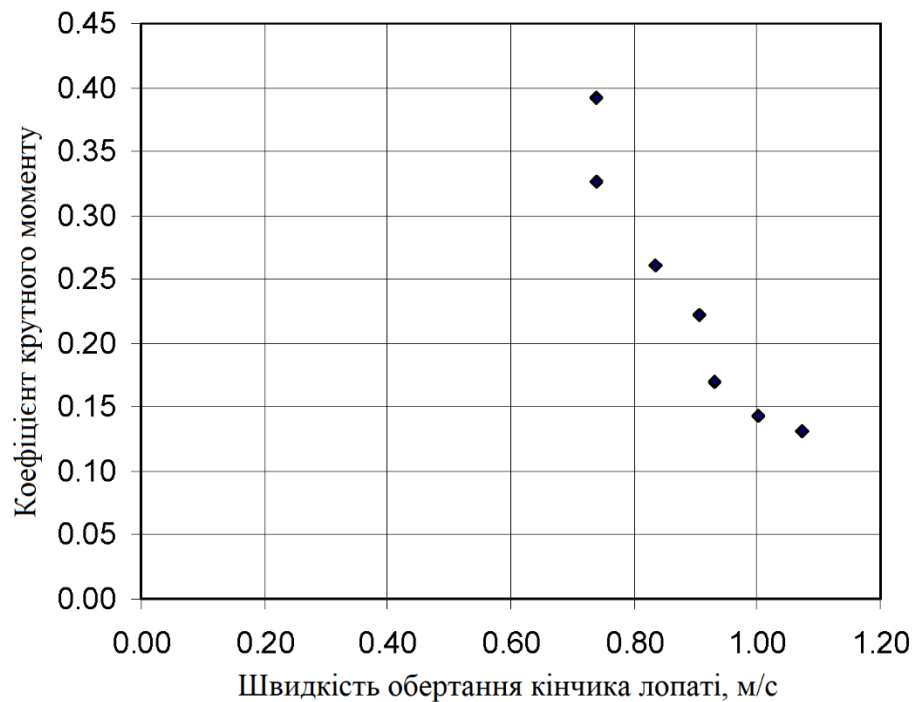


Рисунок 3.18 - Співвідношення крутного моменту та швидкості обертання кінчика лопаті при швидкості вітру 5 м/с

3.5 Результати вимірювань та розрахунків

Графіки, показані на рисунках 3.12 – 3.18, показують характеристики вітрогенератора.

1. Коли вітрогенератор піддавався постійному крутному моменту 2,8 Нм, крива залежності коефіцієнта потужності від швидкості вітру (рис. 3.13) показала максимальне значення коефіцієнта потужності при швидкості вітру між 3,0 і 3,5 м/с. Коефіцієнт потужності при швидкості вітру 3,5 м/с і коефіцієнті швидкості кінчика лопаті 0,84 (рис. 3.13) становить близько 0,14. Коефіцієнт потужності зростає зі збільшенням крутного моменту.

2. При постійному крутному моменті 5,6 Нм крива на рис. 3.13 показала максимальне значення коефіцієнта потужності 0,16 при швидкості вітру 4,0 м/с.

3. При постійному крутному моменті 7,46 Нм крива на рис. 3.13 показує, що максимальне значення коефіцієнта потужності було знайдено при швидкості вітру від 4,0 до 5,0 м/с. Коефіцієнт потужності при швидкості вітру

4,0 м/с і співвідношенні швидкостей кінчика лопаті 0,6 становив 0,16, а коефіцієнт потужності при швидкості вітру 5,0 м/с і співвідношенні швидкостей кінчика лопаті близько 0,71 становив 0,16 рис. 3.13.

4. При постійному крутному моменті 8,39 Нм крива рис. 3.13 показала максимальне значення коефіцієнта потужності 0,16 при швидкості вітру 5,0 м/с і співвідношенні швидкостей наконечників 0,66 (рис. 3.13).

5. На рис. 3.17 побудована крива продуктивності вітрогенератора при швидкості вітру 5,0 м/с. Крива охоплює значення співвідношення швидкостей обертання кінчика лопаті більше 0,74. На цій ділянці кривої коефіцієнт потужності зростає зі зменшенням частоти обертання кінчика лопаті.

З рисунку 3.12 видно, що вихідна потужність зростає зі збільшенням швидкості вітру.

На рисунку 3.14 показано, що швидкість обертання турбіни лінійно зростає зі збільшенням швидкості вітру в межах тестового діапазону швидкості вітру (від 3,0 до 9,0 м/с).

Розрахункова швидкість вітру

Для дослідження продуктивності турбіни при швидкості вітру 4,0 м/с (замість розрахункової швидкості вітру 4,2 м/с) були отримані дані, наведені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 - Енергетичні характеристики при швидкості вітру 4,0 м/с

λ	c_p	T (Нм)	C_t
0,388	0,156	8,39	0,92
0,448	0,16	7,46	0,81
0,600	0,16	5,6	0,61
1,030	0,138	2,8	0,31



Рисунок 3.19 - Крива продуктивності для швидкості вітру 4,0 м/с

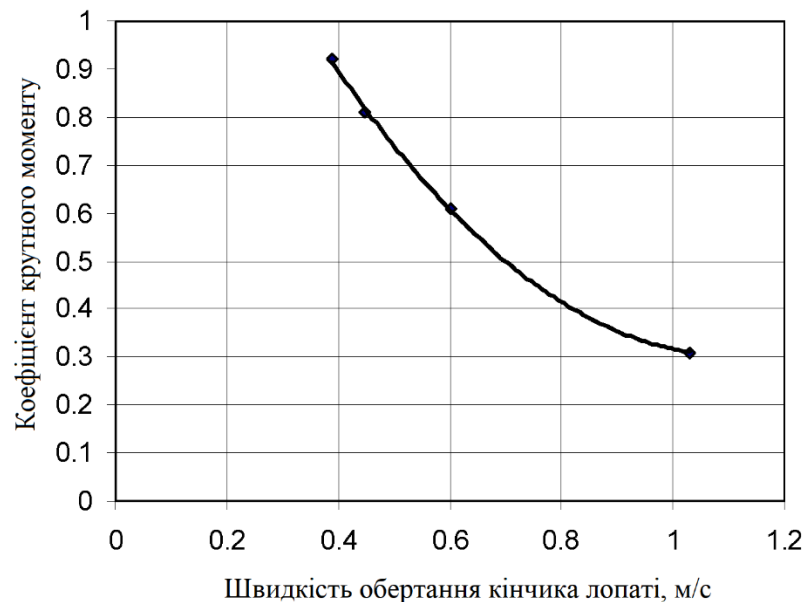


Рисунок 3.20 - Коефіцієнт крутного моменту V_s співвідношення швидкості кінчика лопаті при швидкості вітру 4,0 м/с

Розрахована потужність

Розрахована потужність навантаження, а саме водяного насосу, становить 18,5 Вт (розділ 3.3.1). З кривих потужності, показаних на рисунку 3.12, максимальна потужність при швидкості вітру 4,0 м/с становить 11,7 Вт при співвідношенні швидкостей обертання кінчика лопаті 0,6. Для того, щоб турбіна виробляла необхідну потужність, робоча швидкість вітру повинна

становити 4,65 м/с, отже, фактична необхідна площа для турбіни:

$$A = P / (0,5 C_p \rho v^3)$$

Необхідна площа для швидкості вітру 4,2 м/с = 2,72 м²

Отже, площа ротора повинна бути збільшена на 0,72 м або на 36%.

Таким чином, площа ротора = 2,72/2 = 1,36 м²

Діаметр ротора = 1,33 м.

Висота ротора = 1,00 м.

Необхідна площа для турбіни потужністю 18,8 Вт для різних значень швидкості вітру показана на рисунку 3.21.

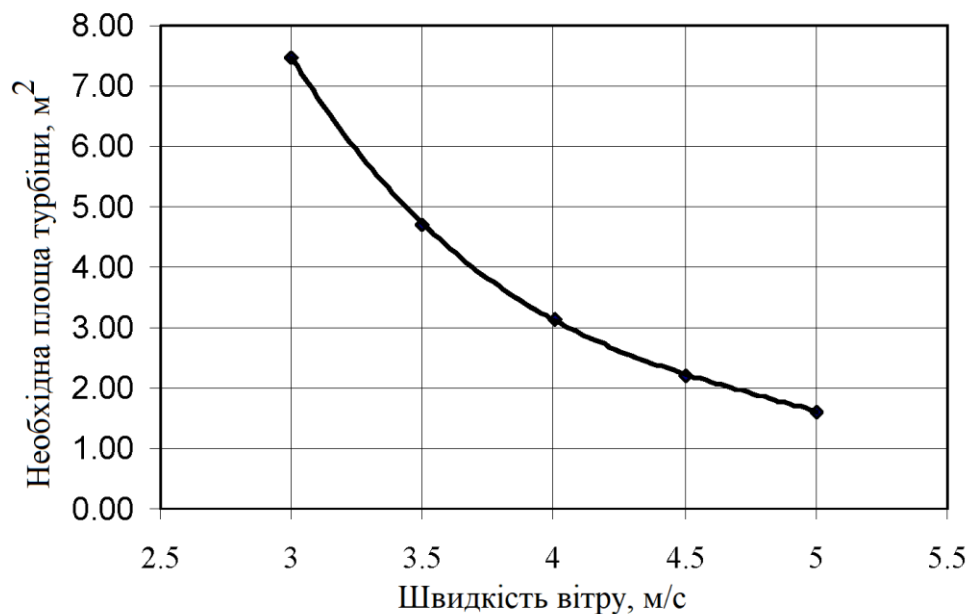


Рисунок 3.21 - Залежність необхідної площі вітрогенератора від швидкості вітру

3.6 Висновки до розділу

1. Встановлено вимоги до проектованої конструкції ротора Савоніуса.
2. Проведено розрахунок конструкції ротора на прикладі вітро-водонасосної установки для забезпечення 100 людей водою. Визначено необхідну площу ротора та геометричні розміри усіх його елементів конструкції.

3. Поведено розрахунок сили та моменту, які діють на вал вітротурбіни, що дало можливість визначити діаметр валу, при якому вітрогенератор буде здатний працювати при швидкостях вітрів 15 м/с.
4. Описано конструкцію експериментального макету двохроторної вітротурбіни та засобів вимірювання швидкості вітру та характеристик вітрогенератора.
5. На основі результатів тестування та проведених розрахунків отримано залежності частоти обертання турбіни, крутного моменту, вихідної потужності, коефіцієнта потужності, коефіцієнта крутного моменту від швидкості вітру для проекрованої вітротурбіни.
6. В результаті побудовано залежність необхідної площі вітрогенератора від швидкості вітру для отримання потужності, необхідної для живлення навантаження (водяний насос, потужністю 18,8 Вт)

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самодопомога) [22]. Найважливіше положення надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона надана, тим більше сподівань на сприятливий наслідок.

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або; будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірьовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому

запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою або перекусити їх інструментом з ізольованими ручками. Перерубувати або перекушувати проводи слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. Після звільнення потерпілого від дії електричного струму необхідно оцінити його стан. У всіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та стійке дихання і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15—20 краплин настоянки валеріани і гарячого чаю.

Ні в якому разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не намацується пульсу необхідно відразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрожувати небезпека або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід

роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Якщо потерпілий знаходиться на висоті, необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі і на опорі.

Опустивши потерпілого на землю, необхідно відразу розпочати проведення штучного дихання та масажу серця і робити це до появи самостійного дихання і відновлення діяльності серця або передачі потерпілого медичному персоналу.

4.2 Теоретичні основи безпеки життєдіяльності

Безпека життєдіяльності є базовим фактором сталого розвитку людини. Безпека - це відсутність загрози для когось або чогось. Небезпеки - це системи, об'єкти, механізми, процеси, явища, їх небезпечні параметри, характеристики, властивості, які за певних умов можуть завдати шкоди здоров'ю та життю людини, суспільства; створюють загрозу навколишньому природному середовищу [22,23].

Небезпеки поділяються на:

- потенційні (приховані);
- перманентні (постійні, безперервні);
- тотальні (загальні).

Раніше джерелом небезпеки були природні явища, представники біологічного світу, різні процеси та явища. З розвитком цивілізації рівень загрози зростає. На сучасному етапі розвитку на перше місце виходять антропогенні небезпеки (створені людиною).

Причини небезпек - це сукупність обставин, які призводять до прояву небезпеки і негативних наслідків: нервових потрясінь, травм, захворювань, інвалідності, а іноді і смерті.

Виникає ланцюжок: «причина - небезпека - наслідки». Усунувши причину, можна усунути прояв небезпеки і, відповідно, наслідки.

Безпека на залізничному транспорті - це такі умови, норми життя і діяльності людей, параметри навколишнього середовища, при яких з певною ймовірністю виключається прояв небезпек з негативними наслідками. Це також система знань, що забезпечує безпеку перебування людини у виробничому і невиробничому середовищі та розвиток безпечної діяльності в майбутньому з урахуванням антропогенного впливу на навколишнє середовище.

На сьогодні фактично існують такі системи безпеки:

- система особистої та колективної безпеки людини в процесі її життєдіяльності
- система захисту навколишнього середовища (біосфери);
- система державної безпеки;
- глобальна система безпеки.

Можна виділити ряд важливих проблем безпеки життєдіяльності:

- підтримання параметрів життєвого середовища в межах, необхідних для життєдіяльності;
- забезпечення населення всіма видами енергоресурсів (електроенергією, газом, нафтопродуктами, вугіллям тощо);
- забезпечення населення всіма нормами і параметрами штучного середовища: житлом, громадським транспортом, громадськими будівлями, спортивними комплексами, медичними установами тощо;
- їжа - фізіологічна основа життя. Якщо людство не буде розробляти нові види їжі і своєчасно не адаптуватися до них, то незабаром опиниться на межі голоду або хімічних отруєнь;
- наявність і раціональне використання питної (прісної) води для забезпечення життєдіяльності;
- ліквідація (переробка або утилізація) відходів виробництва та життєдіяльності.

Комплексний аналіз залізничної системи показує, що ця система може ефективно функціонувати протягом тривалого часу лише в тому випадку, якщо вона здатна захистити себе від небезпек будь-якого походження. Залізнична

система повинна включати підсистему, яка б забезпечувала захист як окремих елементів, так і системи в цілому. Іншими словами, захисту потребує кожна людина, певні соціальні групи людей і все людство разом з навколишнім середовищем.

Небезпека поділяється на зовнішню та внутрішню. Зовнішня небезпека безпосередньо пов'язана з безпекою населення і держави в умовах сучасної війни або локальних конфліктів, глобальних техногенних та екологічних катастроф за межами України. Внутрішня небезпека пов'язана з техногенними та природними катастрофами або спровокована терористичними актами.

Необхідний рівень національної безпеки не може бути досягнутий без використання сучасних методів захисту населення та дотримання наступних принципів:

- Пріоритетність завдань, спрямованих на порятунок життя та збереження здоров'я людей і навколишнього середовища;
- безумовна перевага раціональній та превентивній безпеці;
- вільний доступ населення до інформації, необхідної для захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;
- особиста відповідальність і турбота громадян про власну безпеку, суворе дотримання правил поведінки і дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;
- відповідальність посадових осіб у межах своїх повноважень за дотримання вимог законодавства;
- обов'язкове своєчасне здійснення заходів, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру і мінімізацію їх негативних психосоціальних наслідків;
- врахування економічних, природних та інших особливостей територій і ступеня реальної небезпеки виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;

- максимально можливе, ефективне та комплексне використання сил і засобів, призначених для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру.

4.3 Пожежі та вибухи

Пожежі - трапляються на об'єктах, що виробляють вибухонебезпечні та хімічні речовини. При згорянні багатьох матеріалів утворюються високотоксичні речовини, які вбивають людей частіше, ніж вогонь. У минулому під час пожеж виділявся переважно чадний газ. Але в останні десятиліття горить багато речовин штучного походження: полістирол, поліуретан, вініл, нейлон, поролон. Це призводить до виділення в повітря синильної, соляної та мурашиної кислот, метанолу, формальдегіду та інших високотоксичних речовин [22].

Найбільш вибухо- та пожежонебезпечні суміші з повітрям утворюються при витоках газоподібних та зріджених вуглеводневих продуктів, таких як метан, пропан, бутан, етилен, пропілен тощо.

За останнє десятиліття від третини до половини всіх промислових аварій були спричинені вибухами технологічних систем та обладнання: реакторів, резервуарів, трубопроводів тощо. Пожежі на підприємствах також можуть виникати внаслідок пошкодження електропроводки та механізмів, що знаходяться під напругою, систем опалення.

Певний інтерес (щодо причин) може становити офіційна статистика, що базується на дослідженнях 25 000 пожеж і вибухів, проведених у США:

- несправність електрообладнання - 23 %;
- куріння в недозволеному місці - 18 %;
- перегрів через тертя в несправних вузлах машин - 10 %;
- перегрів паливних матеріалів - 8 %;
- контакт з горючими поверхнями через несправність котлів, печей, димоходів – 7 %;

- контакт з полум'ям, займання від горілки, що горить – 7 %;
- займання горючими частинками (іскрами) від спалювальних установок та обладнання – 5 %;
- самозаймання горючих матеріалів - 4 %,
- займання матеріалів при різанні та зварюванні металів - 4 %.

Понад 63 % промислових пожеж спричинені людською помилкою або некомпетентністю. Коли компанія скорочує штат і бюджет аварійних служб, ефективність їх функціонування знижується, а ризик виникнення пожеж і вибухів, а також рівень людських і матеріальних втрат різко зростає.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз відомих конструкцій вертикально-осьових установок. Встановлено, що вони мають рід переваг перед горизонтально-осьовими. Вертикально-осьові вітроустановки ефективні в умовах нестабільних і турбулентних потоків вітру. Вертикально-осьові турбіни створюють менше шуму, мають нижчу швидкість обертання лопатей та менш небезпечні для птахів і кажанів.
2. На основі проведеного аналізу конструкцій відомих вертикально-осьових вітрогенераторів, запропоновано удосконалити проектовану конструкцію. Наведено основні параметри вітротурбіни та встановлено їх значення, при яких ефективність перетворення енергії вітру є найвищою.
3. Проведено розрахунок конструкції ротора вітрогенератора призначеного для живлення вітро-водонасосної установки для забезпечення 100 людей водою. Визначено необхідну площу вітротурбіни та геометричні розміри усіх його елементів конструкції.
4. Поведено розрахунок сили та моменту, які діють на вал вітротурбіни, що дало можливість визначити діаметр валу, при якому вітрогенератор буде здатний працювати при швидкостях вітрів 15 м/с.
5. Описано конструкцію експериментального макету двохроторної вітротурбіни та засобів вимірювання швидкості вітру та характеристик вітрогенератора.
6. На основі результатів тестування та проведених розрахунків отримано залежності частоти обертання турбіни, крутного моменту, вихідної потужності, коефіцієнта потужності, коефіцієнта крутного моменту від швидкості вітру для проектованої вітротурбіни.
7. В результаті побудовано залежність необхідної площі вітрогенератора від швидкості вітру для отримання потужності, необхідної для живлення навантаження (водяний насос, потужністю 18,8 Вт).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Білевич В.Р. Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни // В.Р. Білевич; А.М.Яковчук; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 11-12.
2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
3. Sharpe, D., Burton, T., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2013). Wind energy handbook (Vol. 355). Wiley.
4. 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.
5. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.
6. Hansen, M. (2015). Aerodynamics of wind turbines. Routledge.
7. Phelps, C., & Singleton, J. (2011). Wind turbine blade design. Cornell University, M. Eng. Report.
8. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б.,

Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214.

9. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

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

11. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакумуючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 71.

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

13. Білоус П.В. Енергоефективність генерування тепла та електроенергії на міні-тес //П.В. Білоус, 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.

– 105-106 с.

14. 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.

15. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants / Myroslav Zin, Vadym Koval, Mykola Tarasenko, Ivan Sysak // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24–31.

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

17. Mganilva, Z. M. (2002). Development of a Savonius wind turbine water pumping system. In International Conference On Water 4th-6th December (pp. 1-10).

18. Ushiyama, I., & Nagai, H. Optimum design configurations and performance of Savonius rotors. Wind Engineering, 59-75.

19. Modi, V. J., & Fernando, M. S. U. K.. On the performance of the Savonius wind turbine.

20. Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. Renewable and sustainable energy reviews, 16(5), 3054-3064.

21. 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.

22. 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.

23. 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.