

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОЗРОБКА ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОЇ МІКРО-ВЕУ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Вільган В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.

(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.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

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

1. Тема роботи Розробка вертикально-осьової мікро-ВЕУ

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

Затверджені наказом ректора від «24» січня 2025 року № 4/7-52.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 14.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Мікро-ВЕУ повинна працювати при номінальній швидкості вітру 7м/с і повинна використовуватися на автомагістралях на роздільних смугах

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

1. Аналіз конструкцій вітрогенераторів з вертикальною віссю

2. Конструкція лопатей

3. Конструкція генератора

4. Розрахунок характеристик проектованої вертикально-осьової мікро-ВЕУ

5. Втрати в генераторі та його ефективність

6. Імітаційне моделювання вітрогенератора з вертикальною віссю

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

1. Типи вітрових турбін

2. Порівняння двох вітрових турбін

3. Ротор з вертикальною віссю

4. Генератор на постійних магнітах

5. Структурна схема випрямляча

6. Графік залежності загальних втрат від швидкості вітру

7. Розрахунок виробітку електроенергії

8. Осцилограми вихідної напруги

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

(підпис)

Вільган В.В.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. - Т. : ТНТУ, 2025.

Стор. 62; рис. 28; табл. 4; креслень (презентацій) __; джерел 19.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розробка вертикально-осьової мікро-ВЕУ».

Метою роботи є розробка малогабаритної вітротурбіни з вертикальною віссю, яка здатна виробляти електроенергію навіть при низькій швидкості вітру.

У роботі проаналізовано вертикально-осьові конструкції вітрогенераторів. Наведено приклад ефективного використання даного типу вітрогенератора на роздільній смузі автошляхів, де додатковий потік вітру створюється при русі авто. Відповідно до умов експлуатації обрано геометричні розміри лопатей та ротора. Висота і ширина однієї лопаті 1,3 м і 0,9 м відповідно. Наведено опис конструкції генератора на постійних магнітах у якого 32 неодимові магніти на роторах та 12 котушок (1200 витків) у статорі. З'єднання котушок – трифазне. Представлено схему розташування котушок та монтажу магнітів. Проведено розрахунок залежності характеристик проектованої вертикально-осьової мікро-ВЕУ від швидкості вітру. А саме, визначено: енергію і потужність вітру; напругу, струм і частоту генератора; генеровану потужність із врахуванням втрат в генераторі. В результаті розраховано кількість електроенергії яку може генерувати вертикально-осьова мікро-ВЕУ з врахуванням характеру зміни швидкості вітру.

Ключові слова: ВЕУ, ВІТЕР, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Викопне паливо	9
1.2 Енергія вітру	9
1.3 Типи вітрогенераторів	9
1.3.1 Вітрогенератор з горизонтальною віссю (HAWT)	11
1.3.2 Вітрогенератор з вертикальною віссю (VAWT)	12
1.3.2.1 Ротор Савоніуса.....	13
1.3.2.2 Машини типу "ДАР'Є"	14
1.4 Випадки, коли варто вибрати вітрогенератор з вертикальною віссю	16
1.5 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Аналіз конструкцій вітрогенераторів з вертикальною віссю	19
2.1.1 Тяговий ротор	19
2.1.2 Ротор піднімального типу	21
2.2 Конструкція лопатей.....	22
2.2.1 Форма лопатей.....	23
2.2.2 Вибір форми лопатей	23
2.3 Конструкція генератора.....	26
2.3.1 Конструкція статора.....	27
2.3.2 Намотування котушок	27
2.3.3 Розташування та з'єднання котушок в статорі	28
2.3.4 Конструкція ротора	29
2.5 Принцип роботи випрямляча напруги	32
2.6 Розрахунок характеристик проекрованої вертикально- осьової мікро-ВЕУ	34
2.6.1 Вихідні дані.....	34

2.6.2 Енергія вітру	34
2.6.3 Напруга та струм, що виробляються генератором	37
2.7 Втрати в генераторі та його ефективність	41
2.8 Висновки до розділу	44
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	45
3.1 Імітаційне моделювання вітрогенератора з вертикальною віссю.....	45
3.2 Результати моделювання	47
3.3 Обговорення результатів розрахунків та моделювання.....	50
3.4 Висновки до розділу	51
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	51
4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В	52
4.2 Причини електротравм, напруга кроку.....	54
4.3 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	59
ДОДАТКИ.....	63

ВСТУП

Актуальність теми.

Населення стрімко зростає, і люди стають все більш залежними від технологій. Оскільки потреба, а іноді, швидше за все, бажання вести технічний спосіб життя зростає з кожним днем, попит на енергію у вигляді електрики сягнув небувалого максимуму. Існує прямий зв'язок між споживанням енергії та розвитком нашого суспільства. Зі стрімким зростанням населення та покращенням рівня життя швидко наближається майбутнє дефіциту енергії. Основними джерелами виробництва електроенергії є невідновлювані джерела енергії, а як ми знаємо, ресурси таких джерел енергії обмежені, і вони є джерелами забруднення нашого довкілля. Рано чи пізно нам доведеться максимізувати використання відновлюваних джерел енергії. Наразі найпоширенішою традиційною практикою використання відновлюваних джерел енергії є використання горизонтальних вітрових турбін.

Хоча електроенергія є ключовим компонентом нашого повсякденного життя, критикам завжди знайдеться що сказати. Виробництво енергії критикують як забруднювач нашої планети, стан якої і без того погіршується. Це правда, але електроенергія завжди була і буде ключовим фактором життєдіяльності суспільства, а для цього необхідно знаходити альтернативні джерела. Вітроенергетика є найефективнішою формою виробництва електроенергії без забруднення навколишнього середовища.

Вітроенергетика - це перспективна форма виробництва електроенергії майбутнього. По суті, кінетична енергія вітру перетворюється на механічну енергію для виробництва електроенергії. Найбільш поширеною і звичною машиною для виробництва енергії вітру є горизонтальна вісь, що складається з ряду лопатей, які обертаються навколо центральної осі, відома як горизонтальна вітрова турбіна або HAWT (горизонтально-осьова вітрогенераторна установка).

Вітер, що дме на лопаті вітрової турбіни, дозволяє лопатям обертатися навколо осі, що за рахунок повторюваного обертального руху виробляє дуже цінне джерело відновлюваної енергії. Вітрові турбіни створюють обертальний рух, а ключовий компонент, який обертається для створення енергії вітру, називається ротором. Перетворення енергії вітру в електричну енергію відбувається за допомогою з'єднання турбіни з електричним генератором.

Альтернативною формою виробництва вітрової енергії, яка є модифікованою версією вітротурбіни з горизонтальною віссю (HAWT), є модель вітротурбіни з вертикальною віссю (VAWT). Перевагою моделі VAWT над аналогом є те, що вона працює незалежно від напрямку вітру. Ключовим компонентом вітротурбіни з горизонтальною віссю є те, що вона потребує системи YAW. Система YAW необхідна для того, щоб спрямовувати турбіну у напрямку вітру, однак вона не потрібна для вітрогенераторів з вертикальною віссю. Лопаті VAWT обертатимуться незалежно від напрямку вітру, що забезпечує економічну ефективність під час виробничого процесу.

Всі вітрогенератори з вертикальною віссю працюють за принципом підйому або опору. Це дослідження було проведено для демонстрації ефективності та продуктивності вертикальної вітротурбіни з ротором Савоніуса. Ротор Савоніуса, в основному, забезпечує підйомну силу, але практично є лобовим пристроєм. Завдяки більшій міцності ротора Савоніуса, він забезпечує вищий пусковий момент порівняно з іншими.

Електроенергію, вироблену генератором, можна зберігати в акумуляторі і використовувати для живлення офісів, вуличних ліхтарів та побутових приладів. Ця вітрова турбіна є портативною, тому може використовуватися на будь-яких швидкісних магістралях або жвавих шосе. Ця турбіна може бути використана в комерційних цілях для малопотужних застосувань. Реалізація такого проекту дозволить зменшити залежність компанії або галузі від електромережі. Загалом, ця форма виробництва електроенергії, зокрема, вертикальні вітротурбіни, придатні для кожної людини, сім'ї, громади та суспільства в цілому.

Мета кваліфікаційної роботи: є розробка малогабаритної вітротурбіни з вертикальною віссю, яка здатна виробляти електроенергію навіть при низькій швидкості вітру. Вона може працювати на роздільниках доріг, узбіччях поїздів або у віддалених місцях - селах, військових містечках, де передача електроенергії від електростанцій є економічно недоцільною.

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

1. Проаналізувати вертикально-осьові конструкції вітрогенераторів.
2. Розробити конструкцію генератора на постійних магнітах.
3. Провести розрахунок залежності характеристик проектованої вертикально-осьової мікро-ВЕУ від швидкості вітру.
4. У середовищі MATLAB провести імітаційне моделювання роботи вертикально-осьової мікро-ВЕУ .

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Виконана згідно вимог [1]. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 62 арк. формату А4, графічна частина – __ аркушів презентації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Викопне паливо

Більшість споживаної енергії на Землі забезпечується викопним паливом. Це досить концентроване і чисте джерело енергії, яке технічно легко експлуатувати, що, в свою чергу, забезпечує дешевше джерело енергії. Нинішнє світове споживання викопного палива для виробництва енергії складається з вугілля на 33 %, нафти 27,7%, природного газу 21,3%

Запаси викопного палива вичерпуються, і спостерігаються наступні тенденції:

- запаси паливних елементів для атомних електростанцій знаходяться на рекордно низькому рівні, і експерти прогнозують, що за нинішніх темпів використання цього запасу вистачить лише на наступні 45 років.
- експерти також прогнозують, що видобуток нафти різко скоротиться після 2025 року.
- запаси вугілля також зменшуються з кожним днем, оскільки, за прогнозами, їх залишилося приблизно на 200 років.

Такі факти спонукають вчених шукати альтернативний метод виробництва електроенергії, що веде до використання відновлюваних джерел енергії, щоб задовольнити і навіть перевершити постійне зростання попиту на енергію.

1.2 Енергія вітру

Сонце [2] є найважливішим джерелом для виробництва вітрової енергії. Коли сонячні промені падають на поверхню землі, вони викликають нагрівання поверхні, що призводить до утворення нерівномірних вітрів. Кінетична енергія вітру може сприяти обертанню і запуску вітрогенераторів, але, по суті, вироблена потужність залежить від швидкості вітру. Загальне емпіричне правило для ідеального вітру - це вітер зі швидкістю приблизно від шести до

восьми метрів на секунду. Насправді, існує дуже мало регіонів відкритої землі, де можна знайти вітер з такою переважаючою швидкістю. Якби це було можливо, вітроенергетика була б провідним джерелом енергії.

Вітроенергетика є одним з найбільш економічно ефективних відновлюваних джерел енергії [3,4], і вона стала одним з найбільш швидкозростаючих джерел виробництва енергії нашого покоління. За довгостроковими прогнозами, вітроенергетика має технічний потенціал, який у п'ять разів перевищує поточне світове споживання енергії, що означає сорокакратне перевищення поточного попиту на електроенергію.

1.3 Типи вітрогенераторів

Існує два типи вітрових турбін: Вітрогенератори з горизонтальною віссю (HAWT) та вітрогенератори з вертикальною віссю (VAWT) [5,6]. Вітрогенератори з горизонтальною віссю (HAWT): На рис. 1.1 (ліворуч) - найпопулярніша модель вітрогенераторів, в яких вісь обертання ротора паралельна землі.



Рисунок 1.1 - Типи вітрових турбін

Вітрогенератори з вертикальною віссю (VAWT): на рис. 1.1 (праворуч) - запропонована модель вітрогенератора для цього проекту. Її вісь обертання перпендикулярна до землі.

1.3.1 Вітрогенератор з горизонтальною віссю (HAWT)

Ротор вітрогенератора з горизонтальною віссю обертається паралельно землі. Зазвичай HAWT складаються з трьох лопатей, проте іноді їх кількість може змінюватися. Основне завдання ротора - сприймати рух вітру, який є лінійним, і перетворювати його в енергію обертання, яка буде використовуватися для передачі енергії безпосередньо до генератора.

Процес створення корисної енергії відбувається наступним чином: вітер пропускається через поверхні лопатей (за формою нагадують аеродинамічні крила), і вітер високого тиску вдаряє спочатку по верхній стороні, що, в свою чергу, створює область низького тиску над аеродинамічними крилами. Різниця між поверхнями високого і низького тиску вітру створює аеродинамічну підйомну силу. Лопаті вітрових турбін повинні бути сконструйовані таким чином, щоб вони мали високе відношення підйомної сили до лобового опору. Оптимальне значення цього співвідношення забезпечить високу ефективність турбіни.

Більшість сучасних HAWT складаються з трьох лопатей. Традиційні HAWT мали багатолопатеві турбіни. Ці ротори мають співвідношення, яке є пропорційним за міцністю та вагою. Це має перевагу в простоті та економічності. Існує дві відомі багатолопатеві турбіни з горизонтальною віссю: Голландський тип і вітрогенератори типу "Парус". Оригінальною моделлю горизонтальної осі була голландська модель HAWT. У той час лопаті були вирізані з дерева. Інша модель, що з'явилася пізніше, - це HAWT типу Sail. Лопаті в цій моделі були розроблені з нейлону, пластику або тканини, а кількість використовуваних вітрил варіюється.

1.3.2 Вітрогенератор з вертикальною віссю (VAWT)

Вісь обертання VAWT перпендикулярна до землі [7]. Вітрогенератори з вертикальною віссю не такі популярні, як традиційні БЕУ, але існує великий простір для досліджень у цій галузі. Ротор Darrieus має вигнуті лопаті, які мінімізують напруження на вигин при нормальній роботі, а сила на лопаті, викликана обертанням, є чистою силою натягу. Ротор Giromill має прямі лопаті, які створюють підйомну силу для перетворення енергії вітру в механічну енергію обертання. Ротор Savonius має лопаті у формі літери "S", що робить ротор більш ефективним.

Багато досліджень присвячено проектуванню VAWT. Небагато роторів було спроектовано за принципом опору, і лише кілька - за принципом підйому. Обидва мають переваги один над одним в різних аспектах. Ротор Савоніуса в основному забезпечує підйомну силу, але практично є тягою. Цей ротор має перевагу у вигляді високого пускового моменту, однак недоліком цього ротора є нижчий ККД порівняно з підйомними турбінами.

Переваги VAWT над традиційним HAWT:

1. VAWT не піддається постійним циклічним гравітаційним навантаженням, оскільки лопаті не обертаються від кінчика до хвоста.
2. Генератор та інші системи управління можуть бути встановлені на землі, що зменшує витрати на виробництво та обслуговування.
3. Система орієнтації за вітром не потрібна, оскільки VAWT пристосовується до будь-якого напрямку вітру.

Найбільшим недоліком, з яким стикається розробка вертикальних вітрогенераторів, є брак знань і досліджень цього явища. Цей недолік швидко усувається.

1.3.2.1 Ротор Савоніуса

Ротор Савоніуса розроблений С.Я. Савоніусом у 1920-х роках. Цей ротор простий за конструкцією і працює при низькій швидкості вітру. Тому ця вітряна турбіна популярна в останні дні. Вітер з будь-якого напрямку змушує цей ротор обертатися. Механічна енергія, що генерується цим ротором, може бути використана різними способами, включаючи перекачування води, вироблення електроенергії, обмолот зерна та багато іншого.

На рис.1.2 показано вітротурбіну Савоніуса зверху і спереду. Дві лопаті у формі літери "С" встановлені на вертикальній осі таким чином, що вони ілюструють форму літери "S".

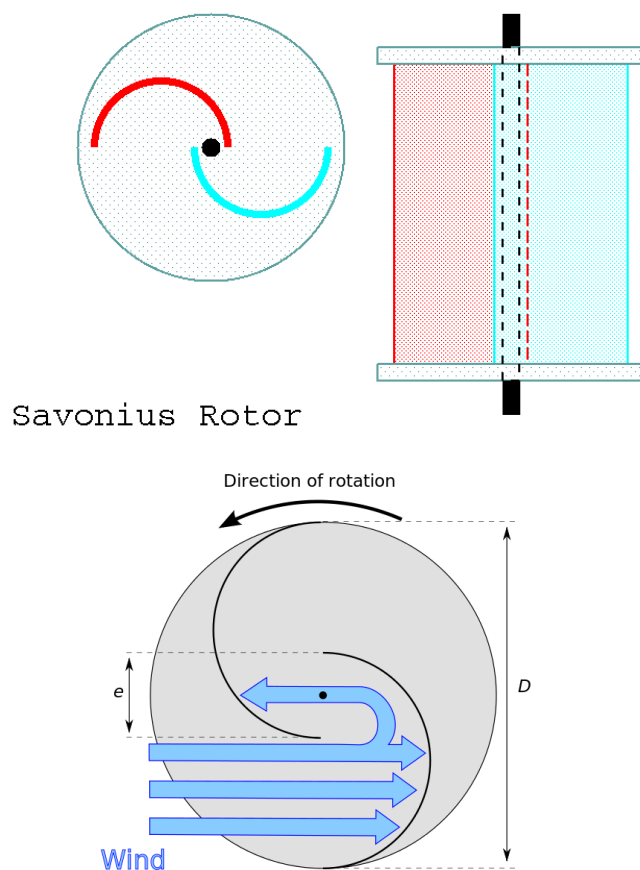


Рисунок 1.2 - Вітрова турбіна Савоніуса

Перекриття обох лопатей в центрі призначене для того, щоб витягувати енергію з вітру зі зниженим тиском. Коли вітер б'є по цих лопатях, чашоподібна

частина лопаті відчуває більшу силу вітру порівняно із закругленою частиною. Зазор між двома лопатями допомагає обертати їх, коли вітер дме з будь-якого напрямку.

Переваги ротора Савоніуса:

- Він має вертикальну вісь обертання, що дозволяє відмовитися від дорогої системи передач для передачі енергії, виробленої лопатями.
- Монтаж на рівні землі та зубчасте зачеплення забезпечують легкий доступ та обслуговування.
- Вежа не потрібна, тому вартість виготовлення низька.
- Ця турбіна самозапускається і має високий пусковий момент.

Недоліки:

- Коли його потрібно встановити на вежу, цей ротор не є оптимальним.
- Ефективність такого ротора є низькою, порівняно з турбінами підйомного типу.
- Він працює тільки на низькій швидкості.

1.3.2.2 Машини типу "ДАР'Є"

Французький інженер, відомий як Ж.Ж.М. Дар'є, винайшов вітрову турбіну Дар'є в 1925 році. Поряд з багатьма перевагами цієї машини, важливою перевагою є те, що вона сконструйована таким чином, що захищає лопаті від тиску згинання при звичайному функціонуванні. Ця машина побудована з використанням двох-трьох тонких, вигнутих лопатей. Вертикальний вал прикріплений до обох кінців леза, тому сила в лезі, що створюється обертанням, є чистим натягом. Це створює механічний крутний момент на центральному валу. Вал передає механічну енергію генератору для вироблення електроенергії.



Рисунок 1.3 - Вітрогенератор типу Дар'є

Переваги:

- Коефіцієнт потужності значно вищий, ніж у S-подібного ротора.
- Ключова перевага цієї конструкції полягає в тому, що лопаті ротора пропускають вітер з будь-якого напрямку.
- Для цього ротора не потрібна система контролю за напрямком вітру.
- Ця турбіна може бути встановлена на рівні землі.
- Цей ротор має високу ефективність і високу швидкість роботи.
- Потенційно низькі капітальні або виробничі витрати.

Недоліки:

- Цей ротор не є самозапускним, тому потребує зовнішнього пускового імпульсу.
- Ефективність вихідної потужності ротора нижча, ніж у звичайного горизонтального ротора
- Оскільки ротор працює ближче до землі, проблема полягає в тому, що це може призвести до зниження швидкості вітру порівняно з HAWT.

– Потрібна гальмівна система з високим крутним моментом, що збільшує вартість виробництва.

Таблиця 1.1 - Порівняння двох вітрових турбін

ВІТРОГЕНЕРАТОР З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ ВІССЮ	ВІТРОГЕНЕРАТОР З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ
1. У випадку горизонтальної осі вітрогенератора повітряні удари наносяться тільки з одного напрямку.	1. У випадку вертикальної осі турбіни повітряні удари наносяться з обох боків.
2. У вітрогенераторі з горизонтальною віссю редуктор не можна розміщувати на землі.	2. У випадку VAWT редуктор, генератор і система управління встановлюються на землі.
3. Для вітрогенератора з горизонтальною віссю необхідна вежа, тому вартість її спорудження висока.	3. У випадку з VAWT башта не є необхідною для машини, а отже, знижується собівартість виробництва.
4. Для вітрогенератора з горизонтальною віссю нам потрібна система рискання.	4. У вітрогенераторі з вертикальною віссю нам не потрібна система рискання.
5. На горизонтальній осі потрібна система управління вітрогенератором.	5. Немає потреби в системі управління, що також знижує загальну вартість і частоту технічного обслуговування.

1.4 Випадки, коли варто вибрати вітрогенератор з вертикальною віссю

Дана кваліфікаційна робота більше підходить для таких місць, як дорожні роздільники. Метою проекту є використання вітрового потоку, що створюється рухомими транспортними засобами, для виробництва електроенергії [8]. Цього

можна досягти, розмістивши невеликі вітрогенератори з вертикальною віссю на розділювальній смузі.

Коли транспортний засіб проїжджає з певною швидкістю, після того, як він проїжджає, створюється вакуум. Це створює завихрення повітря. Вакуум заповнюється навколишнім повітрям, яке мчить у напрямку руху автомобіля. Це повітря має велику кількість і достатню швидкість, і його можна використовувати для обертання лопатей невеликої турбіни. Це дозволяє нам виробляти електроенергію для заряджання 12-вольтової батареї.

Якщо потік транспорту є безперервним, турбіну можна змусити обертатися безперервно, щоб генерувати велику кількість енергії. Спроектувавши відповідні лопаті турбіни для типових умов руху, ми можемо отримати оптимальні результати [5]. Вітрогенератор з горизонтальною віссю не може бути застосований тут, оскільки він може працювати лише з односпрямованим вітром [9]. В той час як вітрогенератор, який буде використовуватися в цьому проєкті, буде працювати з двонаправленим вітром, оскільки він повинен бути встановлений на таких місцях, як дорожні роздільники. Більше того, навіть вітрогенератори з горизонтальною віссю також можна використовувати з двонаправленим вітром, додавши функцію системи ристання, що робить їх більш дорогими. У той час як для ВЕУ VAWT така система не є необхідною. У випадку VAWT, генератор, а також редуктор будуть введені в експлуатацію на рівні землі. Таким чином, ми можемо уникнути будівництва вежі і знизити загальну вартість.

Основним обмеженням цієї турбіни є те, що при її розміщенні на роздільних смугах швидкість роботи турбіни значною мірою залежить від щільності руху та типу транспортних засобів - великих чи малих. На зарядку йде майже цілий день. Це знову ж таки залежить від щільності руху, а також від природної швидкості вітру. Загальна ефективність є меншою, тобто 20%-30%. Для цього ми використовуємо високоефективний генератор. Ми використовуємо алюмінієві лопаті, оскільки вони дешеві, легкі і мають достатню міцність, що значно зменшує їхню вартість. Найбільш унікальною

особливістю цієї конструкції є те, що немає потреби в системі управління, що також знижує загальну вартість і часте обслуговування. Часто в турбінах генератори з'єднуються горизонтально за допомогою зірочок, шківів, ременів, зубчастих передач тощо. Але тут ми з'єднали генератор безпосередньо з маточиною, щоб подолати механічні втрати. Лопаті з'єднані за допомогою поперечних важелів, що робить їх міцними.

1.5 Висновки до розділу

1. Проведена аналіз стану потреб в викопному паливі і можливості його заміщення поновлювальними джерелами енергії такими як вітер.
2. Розглянуто типи вітрогенераторів. Окреслено переваги та недоліки вертикально-осьових і горизонтально-осьових.
3. Детально проаналізовано вертикально-осьові конструкції вітрогенераторів. Наведено приклад ефективного використання даного типу вітрогенератора на роздільній смузі автошляхів, де додатковий потік вітру створюється при русі авто.
4. Описано основні особливості майбутньої конструкції проектного вертикально-осьового вітрогенератора.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз конструкцій вітрогенераторів з вертикальною віссю

2.1.1 Тяговий ротор

Якщо ротор вежі розташований за вітром, вітрогенератор називається навітряним або підвітряним. Лобовий опір регулює її рух відповідно до лобової площі об'єкта, якби він стояв обличчям до вітру. Проектування об'єкту, який швидко рухається крізь рідину, є ефективною ідеєю. Ця теорія [10] допомагає пояснити, чому конструкції автомобілів, підводних човнів та велосипедних шоломів мають довгу форму .

Перевага машин тягового типу полягає в тому, що вони можуть бути сконструйовані без використання механізму орієнтації за вітром. Це відбувається, коли і гондола, і ротор мають відповідну конструкцію, що дозволяє їм рухатися за вітром. Крім того, дуже важливою перевагою такого ротора є його гнучкість. Ця перевага впливає на вагу машини, а також на структурну динаміку. Для того, щоб полегшити навантаження на вежу, лопаті спроектовані таким чином, щоб згинатися при більш високій швидкості вітру. Іншими словами, найважливіша перевага цієї навітряної машини полягає в тому, що вона побудована з використанням меншої ваги порівняно з машинами підйомного типу.

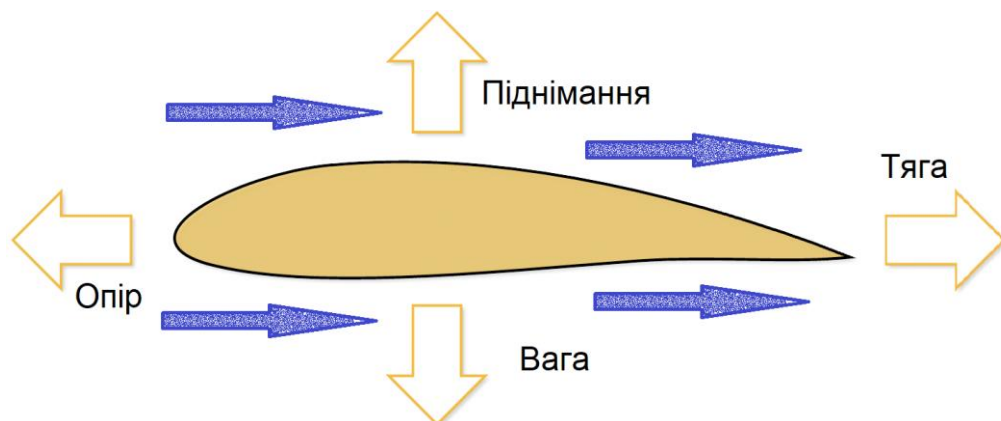


Рисунок 2.1 - Принцип дії крила [10]

–Підйомна сила піднімає крило вгору.

- Вага протидіє цьому, тягнучи вниз.
- Тяга необхідна для створення повітряного потоку.
- Опір протидіє руху вперед.

На рис.2.1 показано принцип роботи ротора тягового типу. Коли лопать рухається вліво, сині стрілки вказують напрямки сили тяги.

Форма об'єкта має вплив на опір. Коефіцієнт C_D - це міра, яка використовується для визначення величини опору для конкретної форми. C_D визначається як сила лобового опору, пропорційна площі лобової частини об'єкта. Типовий автомобіль, який можна побачити в сучасному, має C_D в діапазоні від 0,2 до 0,35. Крім того, біговел має C_D приблизно 0,5. Тим часом, велосипедист, який бере участь у перегонах, має C_D близько 0,45. Однак, форма крила, яка зустрічається на крилах літаків, має найменший C_D - 0,03.

Ротори, які використовуються на сучасних вітрогенераторах, мають надзвичайно високу швидкість обертання, що становить близько 60 м/с. Важливо використовувати лопаті ротора, які мають форму крила, щоб досягти вищого рівня ефективності.

Коефіцієнт швидкості вітроколеса:

$$TSR = \frac{\text{Швидкість леза лопаті}}{\text{Швидкість вітру}}$$

Коефіцієнт швидкості вітроколеса - це співвідношення між швидкістю вітроколеса ротора і швидкістю вітру. Оскільки швидкість вітру є змінним фактором, швидкість прискорення обертання вітрової турбіни залежить від співвідношення швидкості вітроколеса. Для того, щоб виробляти електроенергію, необхідна підвищена швидкість обертання. Якщо порівнювати максимальну швидкість обертання наконечника, то коефіцієнт лобового опору вітрогенератора дорівнює приблизно одиниці, в той час як у вітрогенераторів підйомного типу він дорівнює приблизно десяти. Якщо порівнювати ці два типи вітрогенераторів, то вітрогенератор підйомного типу є найкращим варіантом для цього, оскільки він вимагає підвищеної швидкості обертання.

Ефективність роботи вітрової турбіни залежить виключно від ротора і кількості лопатей, а також від загальної площі, яку вона покриває. Для того, щоб працював належним чином, важливо, щоб вітер міг плавно обтікати лопаті. Важливо пам'ятати про детальні особливості простору між лопатями, оскільки важливо забезпечити відсутність проблем, таких як турбулентність, протягом усього процесу. Щоб уникнути будь-яких проблем під час роботи, важливо переконатися, що вітрові турбіни складаються лише з двох або трьох лопатей.

2.1.2 Ротор піднімального типу

Підйомний тип, також відомий як навітряний, - це коли ротор вітрової турбіни спрямований до вітру. Можливість уникнути вітрової тіні ззаду вежі є найбільшою перевагою, яка була визнана для конструкції піднімального типу. Більшість розробників вітрогенераторів воліють використовувати саме таку конструкцію. Вітер починає згинатися в напрямку від вежі, навіть не долітаючи до неї. Така поведінка відбувається, незважаючи на те, що вежа кругла і гладка. Таким чином, щоразу, коли ротор проходить повз вежу, кількість енергії вітру дещо зменшується. Однак, як і будь-яка інша конструкція, піднімальний тип має і зворотній бік. Слабкість конструкції піднімального типу полягає в тому, що ротор повинен бути виготовлений негнучким і повинен бути віддалений від вежі. Для того, щоб ротор був повернутий до вітру, в машині піднімального типу необхідний механізм орієнтації за вітром, який гарантує, що ротор повернутий до вітру.

Дивлячись на спільні принципи, які можна знайти в літаках, повітряних зміях і птахів, виробники піднімальних лопатей прагнуть досягти тих самих властивостей. Лопать - це, перш за все, аеродинамічний елемент або крило. Різні швидкості вітру і різниця в тиску створюються між верхньою і нижньою поверхнями лопаті, коли повітря протікає повз лопать. Коли тиск взаємодіє з нижньою поверхнею лопаті, тиск набагато більший, отже, поводить ся так, щоб підняти лопать. Підйом перетворюється на обертальний рух, коли лопаті

з'єднуються з центральною віссю, що діє як ротор вітрогенератора. Для виробництва електроенергії вітрові турбіни є кращим варіантом, оскільки вони працюють за рахунок підйомної сили, в результаті чого досягають більшої швидкості обертання порівняно з двигунами, що працюють на тязі.

Для того, щоб визначити, чи залежить конструкція VAWT від лобового опору або підйомної сили, найкращий спосіб – порівняти її TSR. Якщо TSR перевищує 1, це означає, що є деяка підйомна сила. У той же час, TSR нижче 1 означає, що в основному є лобовий опір. Перевага цього полягає в тому, що конструкція, яка базується виключно на підйомній силі, здатна видавати більше потужності при підвищенні ефективності.

Правило інтервалів. Щодо напрямку вітру, вітрогенератори повинні бути вирівняні перпендикулярно. Якщо вітер односпрямований протягом усього дня, відстань між турбінами в ряду становить $2D-3D$, де D - це діаметр ротора. Міжрядний інтервал становить близько $10 D$; зазвичай вітер не є односпрямованим, в такому випадку рекомендується рівномірний інтервал $5-7D$. Для цього є комп'ютерне програмне забезпечення "Мікро позиціонування". Внутрішні трансформатори та кабелі з'єднують аерогенератор з мережею. Кожна турбіна матиме власну схему управління. Підключення до мережі вимагає певної складної схеми захисту, метою якої є:

- ізолювати вітроелектростанцію в разі будь-якої внутрішньої несправності в електричній системі;
- відключити вітроелектростанцію, якщо виникла несправність на будь-якій ділянці інженерної мережі (g_{rid}).

2.2 Конструкція лопатей

У сучасних дослідженнях існує дві різні розробки лопатей ротора Savonius. Дослідження полягало у вивченні швидкості обертання відносно звичайної прямої, а також криволінійної лопаті ротора.

2.2.1 Форма лопатей

Існує чотири різних типи лопатей, які використовувалися для проведення експериментів. Чотири типи лопатей: (а) вигнута лопать, (б) пряма лопать, (в) лопать з аерофольги і, нарешті, (г) скручена лопать [11,12]. Ці чотири лопаті показані на рис. 2.2. На даний момент було проведено декілька досліджень прямих і вигнутих лопатей.

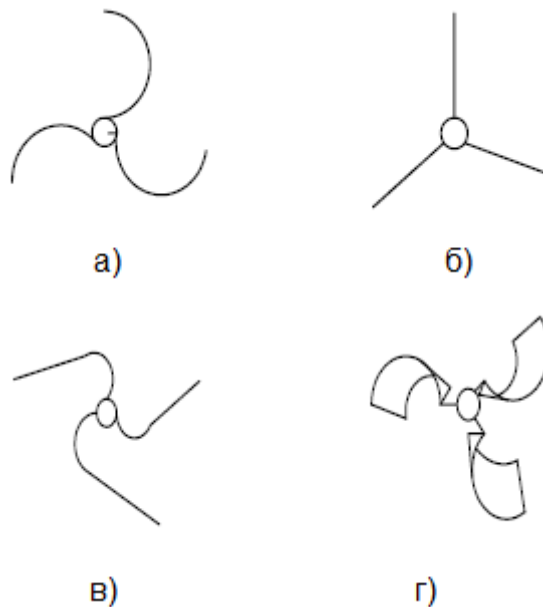


Рисунок 2.2 - Форми лопатей - вигляд у розрізі

В рамках поточного дослідження було розроблено, винайдено і випробувано лопать у формі аеродинамічної сітки, а також скручену лопать..

2.2.2 Вибір форми лопатей

Що стосується швидкості повітря, то під час тестування діапазонів було виявлено, що пряма лопать має меншу ефективність порівняно з іншими лопатями, як показано на рисунку нижче. Причиною цього є збалансована сила опору, що діє на обидві лопаті, оскільки вони розташовані під кутом 120° одна від одної і мають справу з однаковою кількістю повітряного потоку.

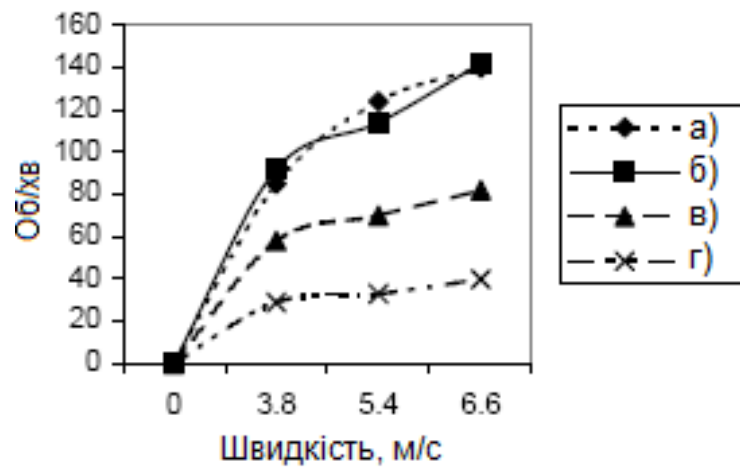


Рисунок 2.3 - Випробувані лопаті: Зміна частоти обертання від швидкості повітря

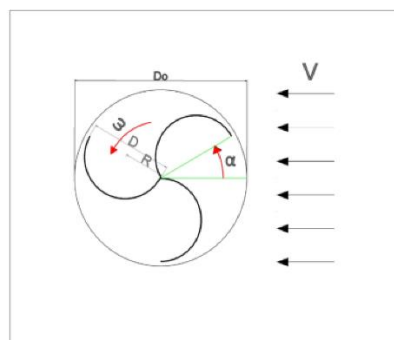
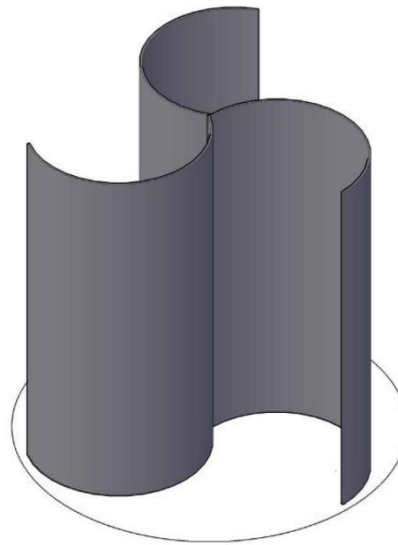


Рисунок 2.4 - Ротор з вертикальною віссю (вигнутий тип лопаті)

Турбіна має три лопаті, розташовані під кутом 120° одна до одної. Така конструкція лопатей дозволяє максимально використовувати енергію вітру, що

падає на неї. Лопаті являють собою цілісну конструкцію у вигляді дуги, що має кривизну меншу за кривизну півкола. Вигнутий тип конструкції не потребує великих зусиль для розгону в порівнянні з іншими заявленими конструкціями. Завдяки тому, що листова сталь GI має довгий список переваг, таких як хороша міцність на розтяг і стиск, міцність і порівняно довгий термін служби, високе співвідношення жорсткості до ваги, хороша стійкість до корозії, вона може бути використана для виготовлення лопатей.

Ідеальним вибором для лопатей був би пластик, армований скловолокном (GRP), але він є занадто дорогим і, отже, звів би нанівець мету виробництва вітрогенератора з низькою вартістю. Розміри лопатей залежать від ширини дорожнього роздільника. Поперечні важелі - це сталеві профіля Y-подібної форми, які мають квадратний поперечний переріз.

Центр вітрогенератора - це з'єднувальна секція між лопатями, що веде до головного валу. Кожна лопать з'єднана з хабом за допомогою трьох сталевих стрижнів. Ці стрижні приварені до хабу, а також прикріплені болтами до лопатей. Довжина поперечної тяги становить 80 см. Для хабу використано сталь. Це зроблено для того, щоб зробити конструкцію стійкою. Хаб з'єднаний з основним валом. Для виготовлення основного валу використано суцільний маловуглецевий прут. Крім того, головний вал має два підшипники. Два підшипники використано для зменшення тертя. Генератор спирається на дерев'яну основу, яка утримується на землі. Завдяки утриманню на землі центр ваги всієї системи опускається нижче.

Таблиця 2.1 - Таблиця розмірів віротурбіни

	Характеристики	Розміри
1.	Ширина кожної лопаті	0,9 м
2.	Висота кожної лопаті	1,3 м
3.	Кут між поперечинами	120°
4.	Загальна висота	1,5 м

У таблиці 2.1 наведено розміри лопатей для малогабаритних вітрогенераторів з вертикальною віссю. Ширина та радіус є найважливішими конструктивними параметрами лопаті.

2.3 Конструкція генератора

Генератор на постійних магнітах використовується для невеликих вітрогенераторів з вертикальною віссю. Його також можна назвати "генератором змінного струму", оскільки його основне призначення - генерувати змінний струм (АС). Він генерує трифазний змінний струм низької напруги, який потім перетворюється в постійний струм (DC) за допомогою випрямлячів для зарядки акумуляторів.

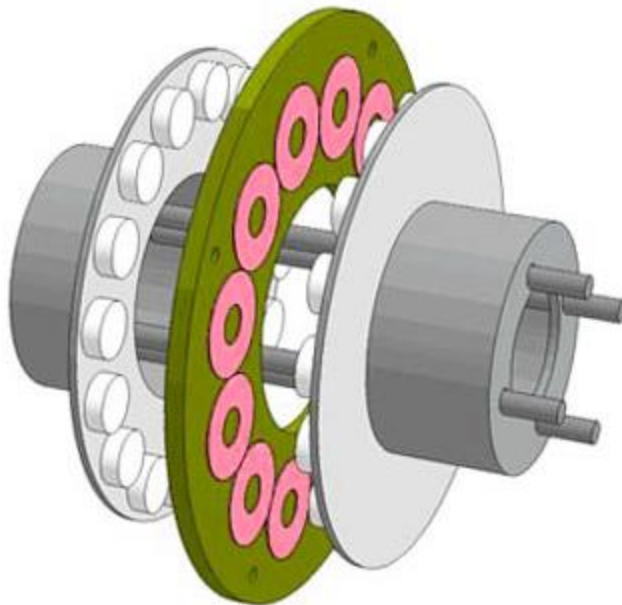


Рисунок 2.5 - Генератор на постійних магнітах

На рисунку вище зображено генератор на постійних магнітах (ПМГ). Основними компонентами генератора на постійних магнітах є диск статора, який містить дванадцять котушок обмотки статора. Також два диски ротора, які містять 32 магніти (по 16 магнітів на кожному). Також є вал, який відіграє ключову роль у з'єднанні магнітних дисків ротора з лопатями вітрової турбіни.

2.3.1 Конструкція статора

Щоразу, коли провідник перетинає магнітні силові лінії, в ньому індукується ЕРС - це закон електромагнітної індукції для генераторів. Відповідно до цього закону в котушках статора індукується трифазний змінний струм. Для обмотки статора використовується дванадцять котушок по 1200 витків. Розмір дроту для цих котушок був визначений шляхом розрахунку потоку струму в генераторі або статорі. Трифазна напруга з котушок статора подається на систему перетворювача для перетворення змінного струму в регульований постійний струм.

Розмір дроту для цих котушок був визначений шляхом розрахунку потоку струму в генераторі або статорі. Ця конструкція розрахована на використання при низьких і середніх швидкостях вітру. Для роботи при більшій швидкості вітру нам потрібно було б змінити розмір дроту котушок, ця зміна дозволить зменшити втрати міді в обмотці статора. Інший спосіб збільшити струмопропускну здатність котушок - змінити спосіб з'єднання котушок.

2.3.2 Намотування котушок

На рис.2.6 показані розміри котушок, що використовуються для цієї конструкції. Дванадцять котушок по 1200 витків з мідного дроту, покритого скловолокнистою смолою.

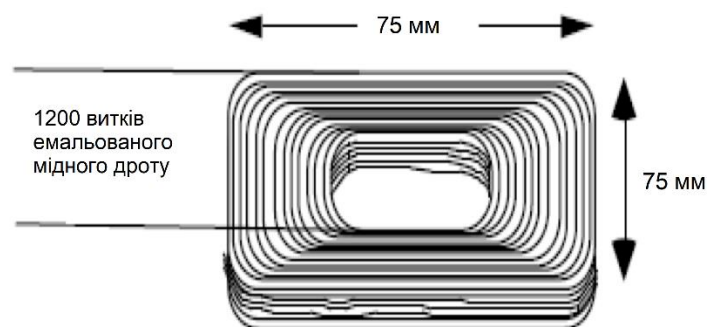


Рисунок 2.6 - Розміри котушки

Для забезпечення правильного з'єднання та оптимальних результатів гнучкі хвости кожної котушки повинні мати довжину від 800 мм до 1000 мм. Важливо переконатися, що кожне з'єднання котушок припаяне належним чином.

Нумерація та кольорове кодування спрощує процес з'єднання. Всі котушки повинні бути пронумеровані відповідно. Початкова і кінцева точки кожної котушки повинні бути позначені, тобто А для початкової точки і В для кінцевої точки. Гнучкі вивідні дроти повинні бути достатньо довгими, щоб з'єднати котушки в точці виходу на диску статора.

2.3.3 Розташування та з'єднання котушок в статорі

На рис.2.7 показано розташування котушок на диску статора. Всі котушки розміщені на однаковій відстані, тому дванадцять котушок повинні бути розміщені в 360-градусній формі. Кожна котушка знаходиться на відстані тридцяти градусів від сусідніх котушок. Центральне коло диска статора потрібно вирізати, щоб з'єднати верхній і нижній магнітні диски за допомогою довгих шпильок через статор. Для досягнення збалансованого з'єднання на кожній фазі буде підключено по чотири котушки.

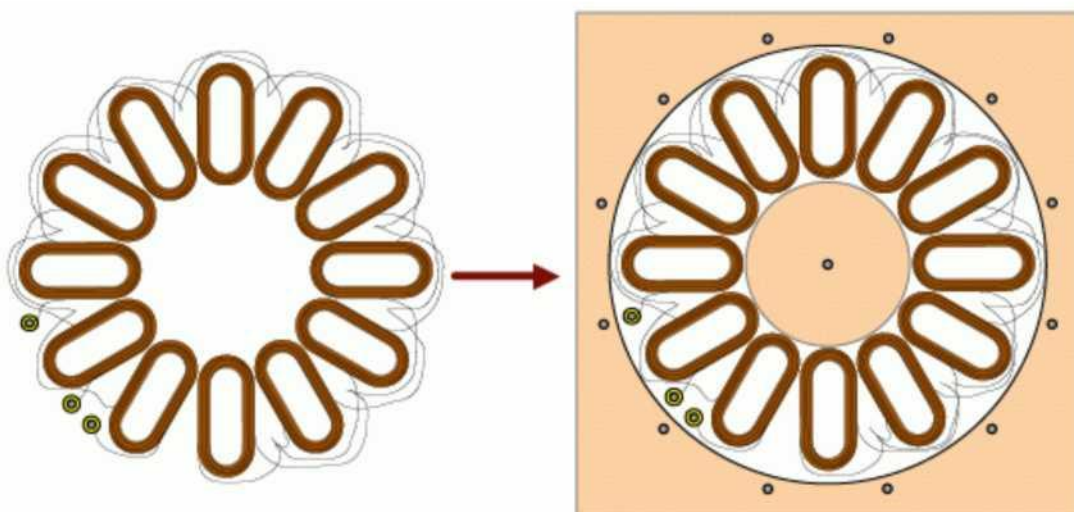


Рисунок 2.7 - З'єднання котушок в статорі

2.3.4 Конструкція ротора

Магнітний ротор складається з металевого диску (основи) і постійних магнітів (рис. 2.8). Виготовлення ротора генератора вимагає, щоб диск ротора був виготовлений зі сталі, і важливо зазначити, що для підвищення ефективності генератора не слід використовувати нержавіючу сталь або алюміній. У генераторі використовуються два магнітні ротори. Статор розміщений між двома магнітними роторами, а на кожному магнітному роторі розміщено шістнадцять магнітів. Верхній і нижній ротори з'єднані між собою довгими шпильками через диск статора (див. рис. 2.5). Верхній і нижній ротор з'єднані з центральним валом, а цей вал з'єднаний безпосередньо з лопатями вітрогенератора.

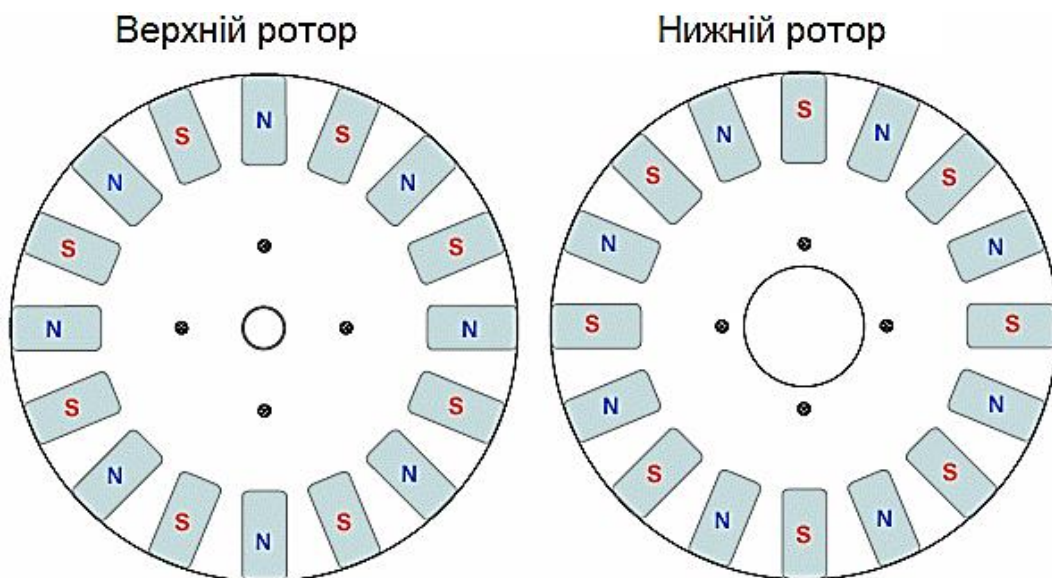


Рисунок 2.8 - Верхній і нижній ротори в зборі

Постійні неодимові магніти, що використовуються в цій конструкції мають розміри 50 мм · 50 мм · 10 мм. Неодимові магніти є одним з найпоширеніших типів магнітів, і саме цей тип магнітів використовується в даному проекті вітрогенератора. Ці магніти є найсильнішими та найдовговічнішими магнітами, доступними на ринку. Неодимові магніти

забезпечують максимальну продуктивність при мінімальних розмірах. Оскільки ці вітрогенератори з вертикальною віссю будуть встановлені на відкритому повітрі, в умовах екстремальних температур, неодимові магніти забезпечують роботу у діапазоні температур від +150 градусів за Цельсієм до -150 градусів за Цельсієм, чого не може забезпечити жоден інший аналогічний магніт.

Ключовою характеристикою неодимового магніту є висока щільність магнітного потоку. Крім того, він має кращу коерцитивність. Він також має більшу намагніченість насичення в порівнянні з іншими. На їх поверхню наноситься захистне покриття, щоб уникнути окислення. Ці магніти забезпечують хорошу продуктивність в різних температурних діапазонах. І також, що більш важливо для виробництва, неодимові магніти мають найнижчу ціну в порівнянні з іншими магнітами з тими ж магнітними властивостями і можливостями.

Розташування двох роторів повинне бути чітко паралельно. Діаметр кожного магнітного диска (пластини) становить 305 мм.

Важливо, щоб верхня поверхня постійних магнітів, розташованих на диску, мала чергування N-S-N-S. Для того, щоб бути впевненим, що процедура проводиться правильно, існує методика для перевірки. Перед тим, як приклеїти магніт, слід переконатися, що тримаєте його близько до попереднього магніту, щоб вони відштовхувалися, а потім встановіть блок, не повертаючи його (рис. 2.9). По черзі встановлюються всі магніти на диск ротора магніту. Після розміщення всіх магнітів, коректність їх монтажу перевіряється за допомогою іншого магніту: по черзі проводять магнітом через кожен магніт, і магніт у вашій руці буде по чергово притягуватися і відштовхуватися.

На рис. 2.8 показано, як розмістити магніти та верхній і нижній магнітні ротори. Тут використовується 32 магніти (50мм·50мм·10мм). Обидва ротори з'єднані сталевими шпильками або довгими міцними гвинтами через статор. Повна збірка генератора показана на рис. 2.10.

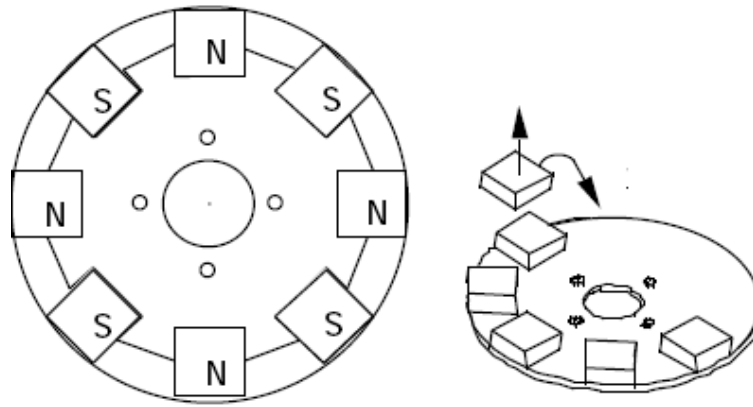


Рисунок 2.9 – Розміщення магнітних блоків

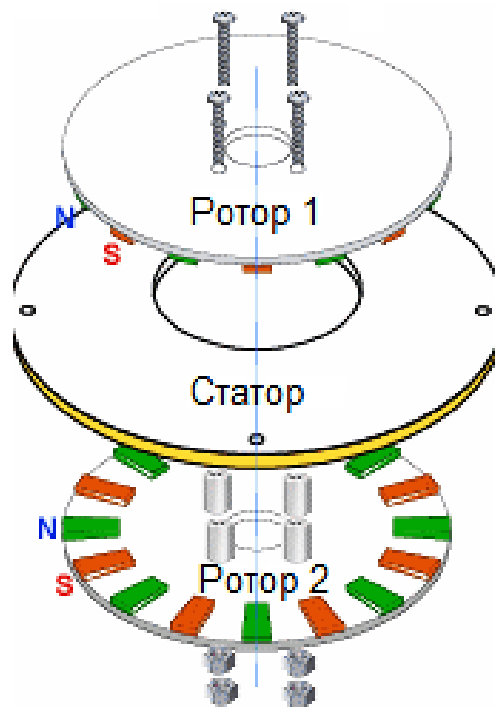


Рисунок 2.10 - Збірка генератора на постійних магнітах

На рис.2.10 показано верхній магнітний ротор, нижній магнітний ротор і диск статора. Обидва ротори з'єднані з лопатями вітротурбіни через вал. Лопаті обертатимуть обидва ротори, а котушки статора перерізатимуть магнітні силові лінії, які вироблятимуть електроенергію.

2.5 Принцип роботи випрямляча напруги

На рис.2.11 показано структурну схему випрямляча напруги. Основними компонентами цієї системи є:

- блок випрямляча та фільтра;
- блок контролера.

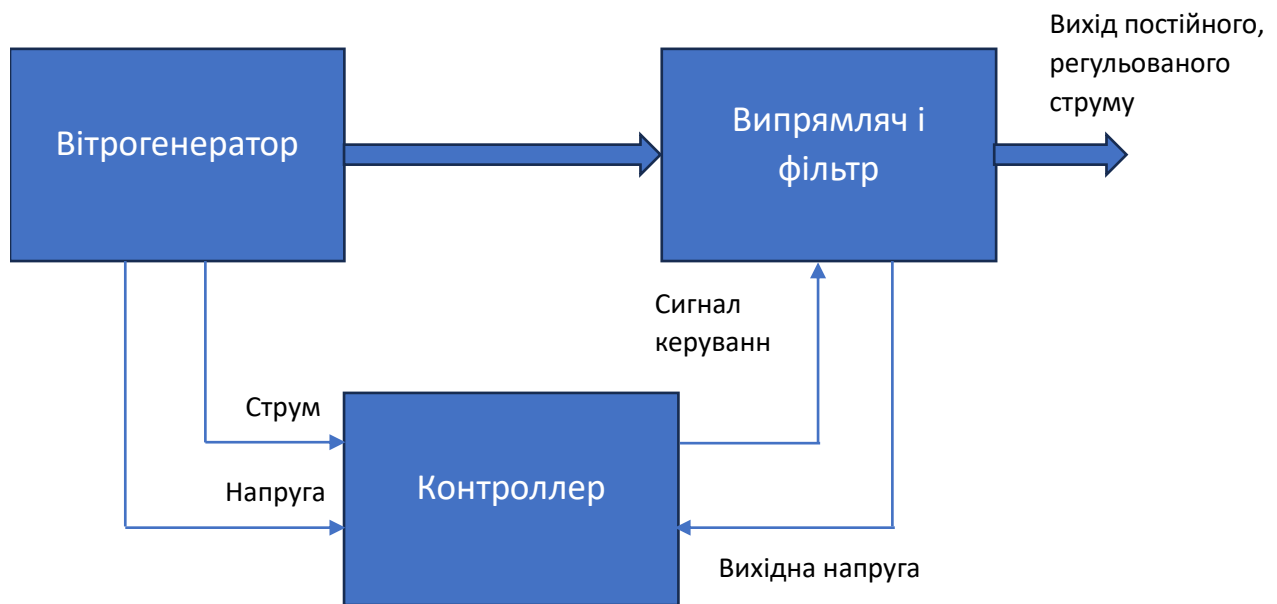


Рисунок 2.11 - Структурна схема випрямляча

Випрямляч - це пристрій, який перетворює змінну вхідну напругу в пульсуючу постійну напругу. Трифазний ШІМ-реверсивний випрямляч використовується для перетворення змінного струму в регульований постійний на виході. Найважливішою метою цієї перетворювальної системи є забезпечення якості та захисту електроенергії. Ця перетворювальна система також забезпечує захист від перевантаження по струму на стороні навантаження, обмежуючи амплітуду струму в колі. Цей процес зменшує втрати міді та покращує коефіцієнт потужності системи. Поєднання декількох

вітрогенераторів в одній перетворювальній системі може забезпечити оптимальні результати з точки зору генерації електроенергії.

На рис. 2.12 показано випрямляч, фільтр і контролер, оптимізовані для цієї конструкції. Він складається з випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією, конденсатора та акумуляторної батареї [13,14,15]. Вертикальні вітрогенератори генерують 3-фазну енергію (змінну напругу, струм і частоту). Трансформатори струму L використовуються тут для забезпечення зворотного зв'язку по струму з контролером, а конденсатор C використовується тут для забезпечення зворотного зв'язку по напрузі з контролером. Основна мета цієї перетворювальної системи - подавати постійну напругу 12 В постійного струму на акумуляторну батарею [15]. Іншим важливим завданням є досягнення синусоїдальної форми хвилі для струму, що генерується, а також синхронізація струму та напруги у фазі [16].

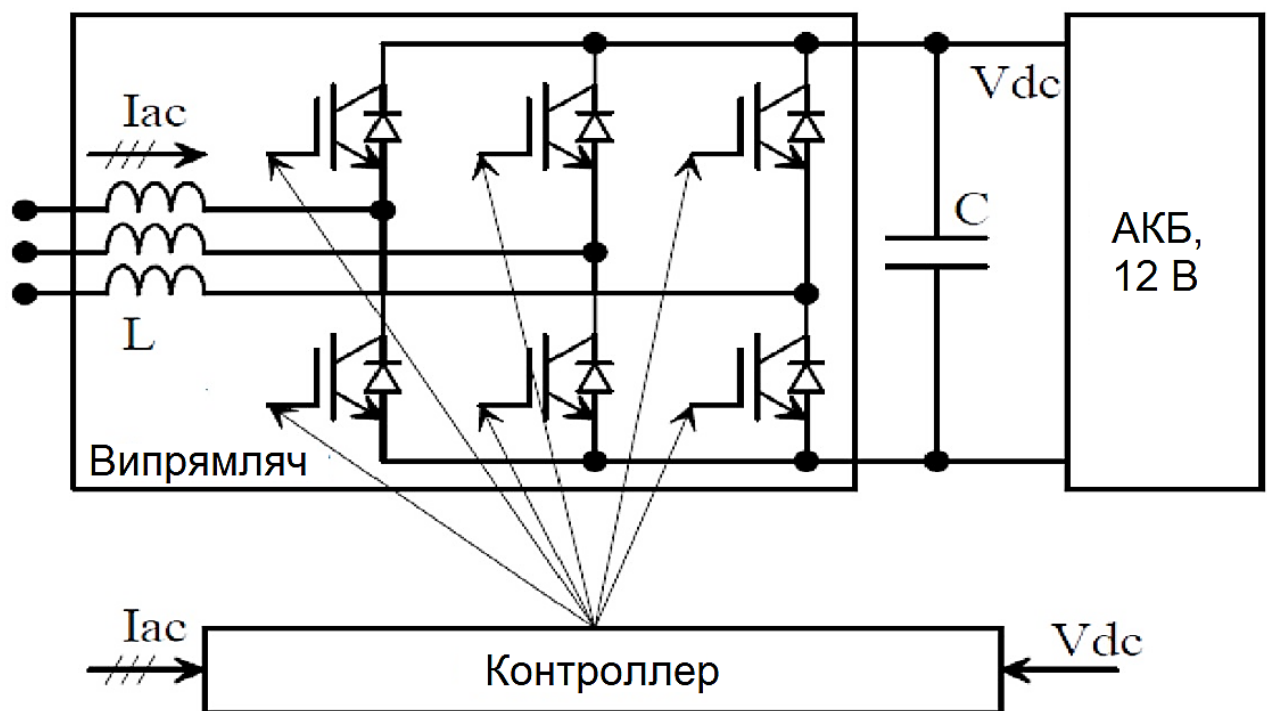


Рисунок 2.12 - Схема 3-фазного ШІМ-випрямляча

2.6 Розрахунок характеристик проектованої вертикально-осьової мікро-ВЕУ

2.6.1 Вихідні дані

Вихідні дані для розрахунків наступні. Номінальна швидкість вітру для цієї турбіни становить 7 м/с. Радіус вітрової турбіни - 0,9 м. Загальна висота лопаті турбіни - 1,3 м. Максимальна густина потоку B_{max} - 1,62.

При розрахунках продуктивності ВЕУ важливим є розподіл швидкості вітру впродовж року [17]. Швидкість вітру коливається протягом року. Одним з ключових елементів проектування вітрової турбіни є наявність вітру в місці встановлення вітрової турбіни. Необхідно передбачити і виміряти характеристики вітру в цьому місці. Модель розподілу Релея є найбільш прийнятною моделлю для проектування вітрових електростанцій. Ця модель представлена рівнянням (2.1). А графічно розподіл Релея зображено на рис. 2.13.

$$p_v = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{v}{\bar{v}^2} \right) e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2} \quad (2.1)$$

де,

v - швидкість вітру в м/с;

$\bar{v}$ - середнє значення швидкості вітру в м/с.

2.6.2 Енергія вітру

Рух маси молекул повітря під дією вітру створює кінетичну енергію вітру, яку можна обчислити,

$$\text{Кінетична енергія} = \frac{1}{2} \cdot \text{Маса} \cdot v^2 \quad (2.2)$$

Оскільки маса повітря дорівнює площі, помноженій на швидкість і густину, тоді потужність вітру можна розрахувати, використовуючи рівняння кінетичної енергії та маси повітря,

$$\text{Потужність} = \frac{1}{2} \cdot \text{Площа} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.3)$$

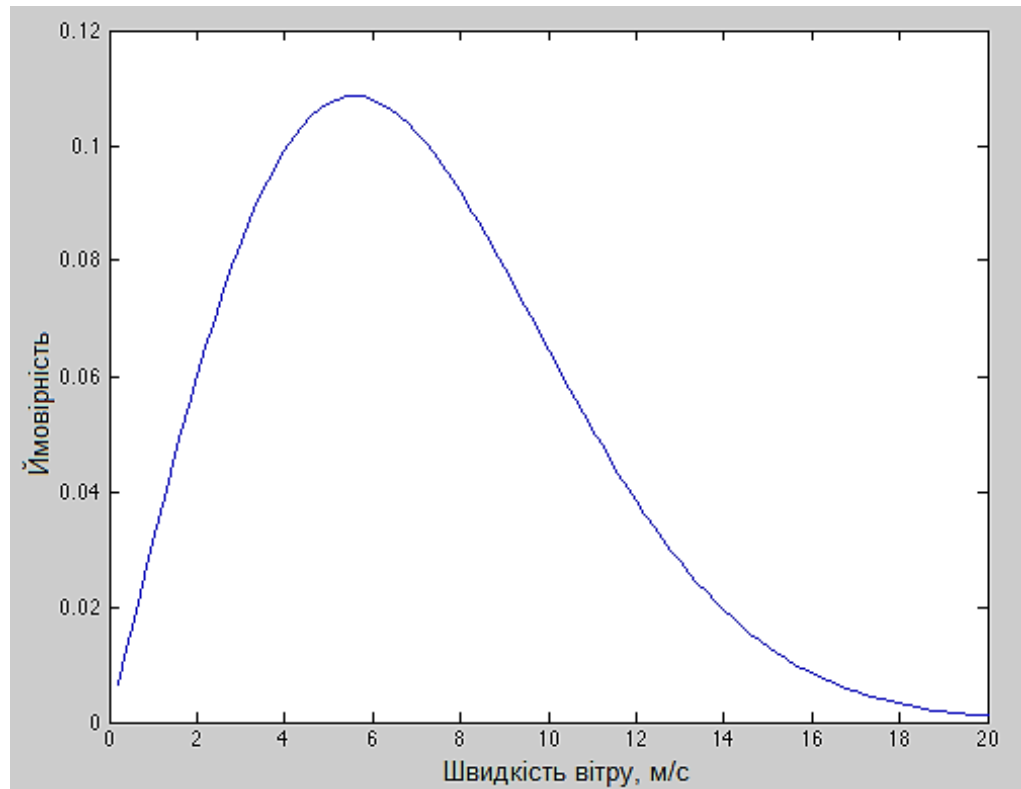


Рисунок 2.13 - Розподіл Релея - ймовірність швидкості вітру

На практиці 100% передача енергії від вітру до ротора вітрової турбіни неможлива. Втрати енергії можна врахувати в рівняннях, враховуючи значення коефіцієнта потужності. Тоді рівняння потужності вітру набуває вигляду (2.4).

$$P_{\text{вітру}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \rho A_t v^3 \quad (2.4)$$

де,

C_p - коефіцієнт потужності;

ρ - густина повітря;

A_t - площа поперечного перерізу турбіни = $\pi r h$ (для вітрогенератора з вертикальною віссю)

Підставивши вихідні дані отримуємо величину енергії вітру:

$$P_{\text{вітру}} = \frac{1}{2} \cdot 0,52 \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot 1,3 \cdot 0,9 \cdot 7^3 = 401,55$$

На рис. 2.14 показано графік залежності між швидкістю вітру та потужністю. З графіка можна сказати, що потужність вітру зростає зі збільшенням швидкості вітру. Практичний графік залежності швидкості вітру від потужності вітру для вертикально-осьової вітрової турбіни дещо відрізняється від цього графіка.

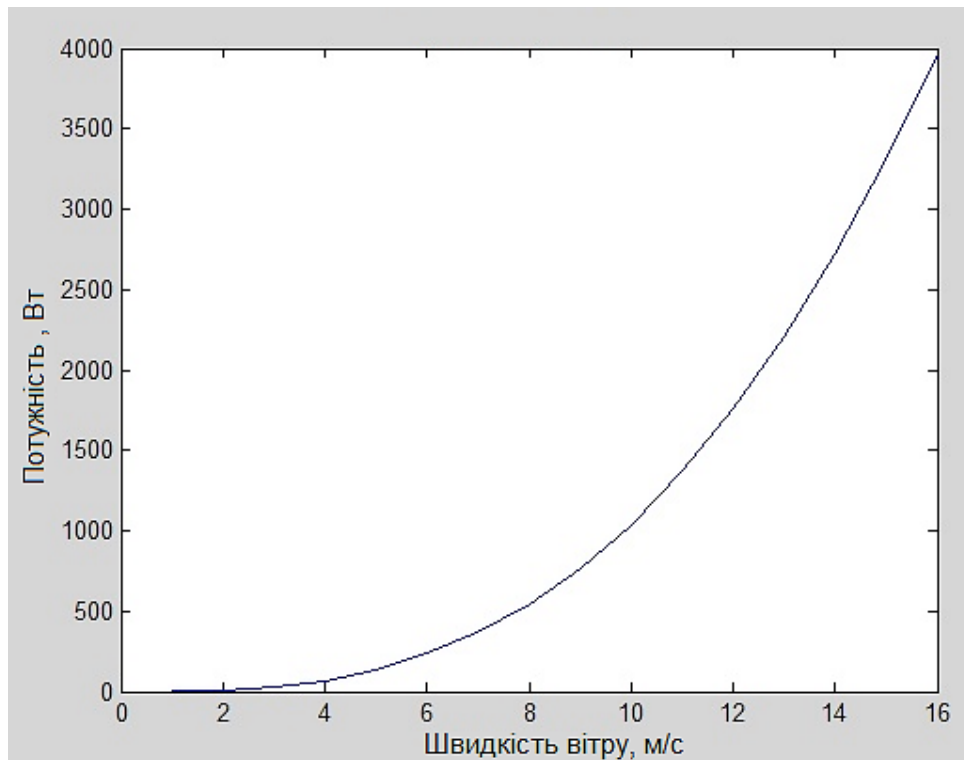


Рисунок 2.14 - Залежність потужності вітру від його швидкості

На рис. 2.15 показано графік поведінки системи керування та відповідна залежність між швидкістю вітру та генерованою потужністю. З графіка видно, що генерація починається при швидкості вітру 3 м/с і швидкість при якій гальмується і вимикається вітротурбіна - 16 м/с. Цей графік є фактичним практичним графіком залежності швидкості вітру від потужності вітру, тому він називається графіком поведінки.

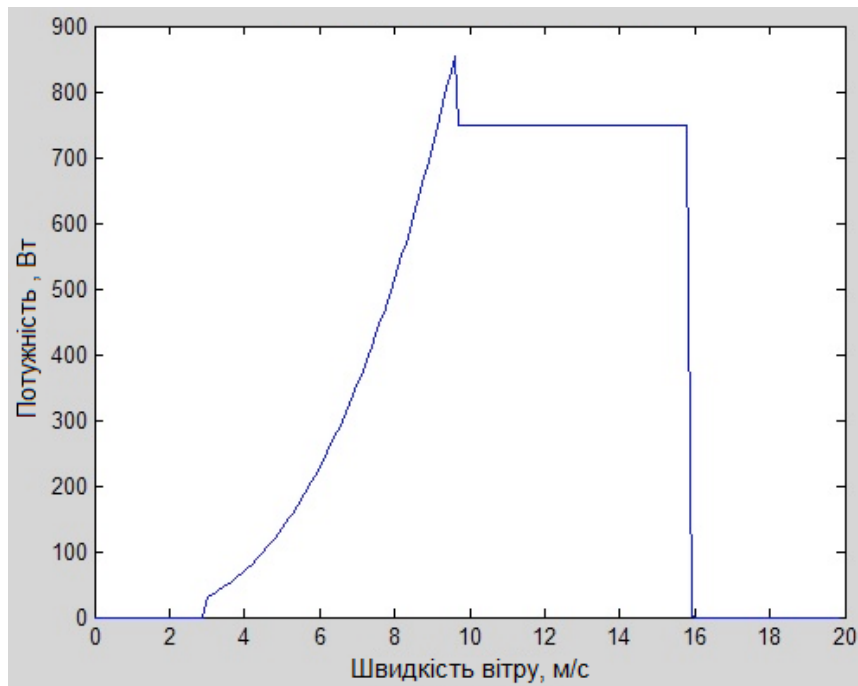


Рисунок 2.15 – Генерована потужності і швидкість вітру при спрацюванні системи захисту від шквальних вітрів

2.6.3 Напруга та струм, що виробляються генератором

Кутова частота (w_{mex}) пов'язана зі швидкістю вітру вітрової турбіни,

$$w_{mex} = TSR \cdot \frac{v}{r}, \quad (2.5)$$

де r - радіус турбіни;
 v - швидкість вітру

У нашому випадку:

$$w_{mex} = 0,5 \cdot \frac{7}{0,9} = 3,89 \text{ рад / сек}$$

Коефіцієнт кроку - це міра різниці між індукованою напругою в котушці з коротким кроком і котушці з повним кроком. Коли машина не має $q=1$, будуть втрати в магнітному потоці, що призведе до зменшення індукованої напруги.

$$k_p = \sin\left(\frac{180Pn}{2Q}\right) = 0,9945. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт розподілу - це відношення фазової суми індукованої ЕРС в обмотці статора до арифметичної суми індукованої ЕРС в обмотці статора. Цей фактор також призводить до зменшення індукованої напруги.

$$k_d = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = 0,9834. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт намотування - це добуток коефіцієнта кроку та коефіцієнта розподілу.

$$k_w = k_d k_p = 0,9834 \cdot 0,9945 = 0,9780. \quad (2.8)$$

Механічна та електрична частота розраховуються за рівняннями:

$$f_{\text{мех}} = \frac{\omega_{\text{мех}}}{2\pi} = 0,619 \text{ рад} / \text{сек} \quad (2.9)$$

$$f_{\text{елект}} = \frac{\omega_{\text{мех}}}{4\pi} \cdot \rho = 9,90 \text{ Гц} \quad (2.10)$$

де $f_{\text{мех}}$ - механічна частота;

$f_{\text{елект}}$ - електрична частота, частота індукованої напруги;

$\omega_{\text{мех}}$ - кутова частота.

На рис. 2.16 показано залежність між швидкістю вітру та електричною частотою. З графіка видно, що частота прямо пропорційна швидкості вітру, вона змінюється лінійно зі швидкістю вітру.

Індукована фазна напруга

$$U_{LN} = \sqrt{2} \pi f_{\text{елект}} n \phi k_w$$

$$U_{LN} = \sqrt{2} \pi \cdot 9,90 \cdot 120 \cdot 0,0026 \cdot 0,978 = 13,61 \quad (2.11)$$

де U_{LN} - індукована фазна напруга;

k_w - коефіцієнт обмотки;

$f_{\text{елект}}$ - електрична частота, частота індукованої напруги;

n - кількість провідників на фазу в статорі;

ϕ - магнітний потік.

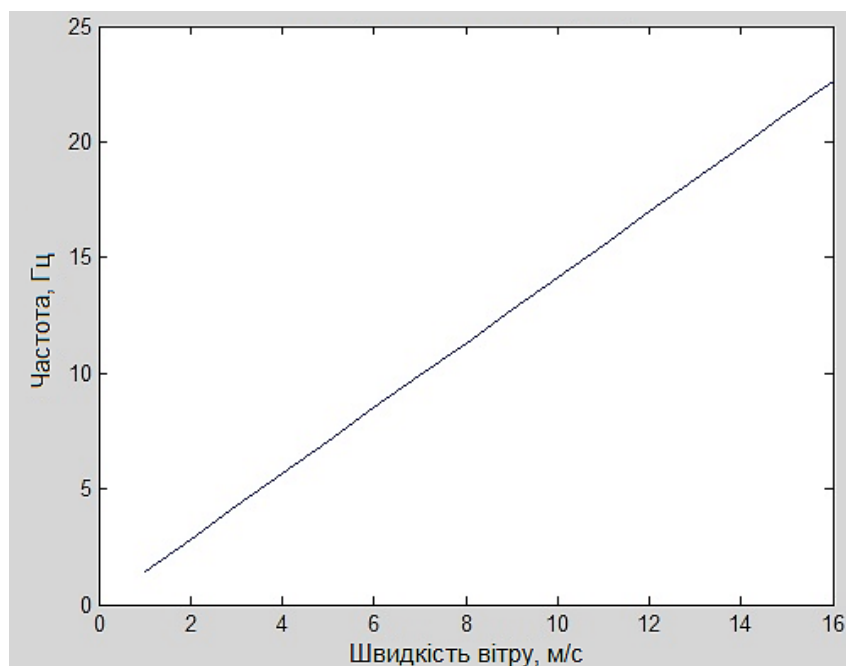


Рисунок 2.15 - Графік залежності частоти напруги від швидкості вітру

На рис.2.16 показано графік залежності між швидкістю вітру та індукованою фазною напругою. З графіка можна сказати, що індукована фазна напруга прямо пропорційна швидкості вітру, вона змінюється пропорційно з нею.

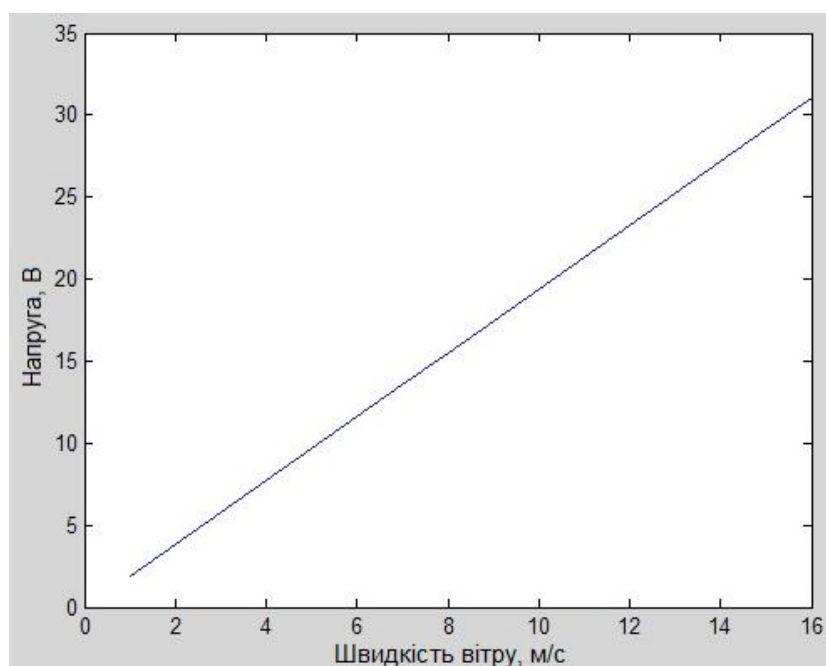


Рисунок 2.16 - Графік залежності фазної напруги від швидкості вітру

Індукована лінійна напруга

$$U_{LL} = \sqrt{3}U_{LN} = 23,57B \quad (2.12)$$

На рис.2.17 показано графік залежності між швидкістю вітру та індукованою напругою між фазами. З графіка можна сказати, що індукована лінійна напруга прямо пропорційна швидкості вітру, вона змінюється лінійно з нею.

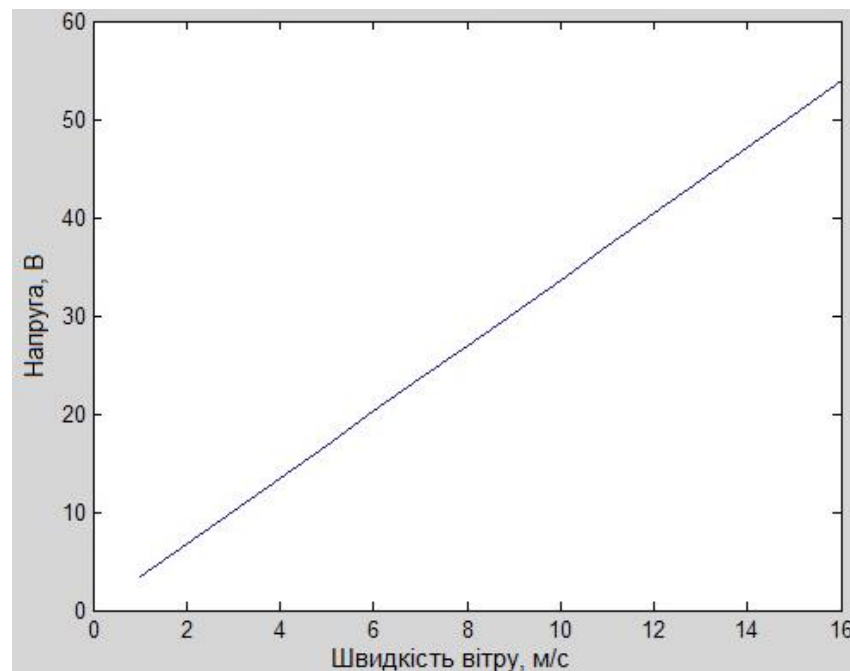


Рисунок 2.17 - Графік залежності напруги між фазами від швидкості вітру

Номінальний струм фази генератора розраховується за формулою (2.13).

$$I = \frac{P}{3 \cdot U_{LN}} = \frac{401,55}{3 \cdot 13,61} = 9,83A \quad (2.13)$$

На рис.2.18 показано залежність між швидкістю вітру та струмом генератора. З графіка видно, що струм пропорційний швидкості вітру, він зростає зі збільшенням швидкості вітру.

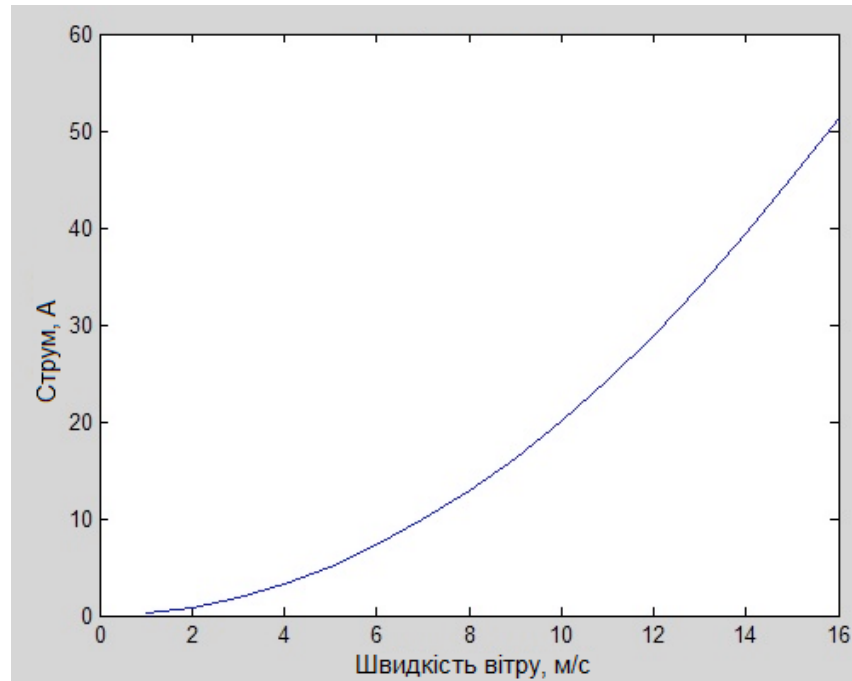


Рисунок 2.18 - Графік зміни струму від швидкості вітру

2.7 Втрати в генераторі та його ефективність

Існує два типи втрат у генераторі: механічні та електромагнітні. Електромагнітні втрати включають втрати в сталі та в міді (резистивні). Втрати в міді залежать від внутрішнього опору провідника. В нашому випадку $R_{inn} = 0,1037 \text{ Ом}$. При проходженні струму через провідник виділяється тепло, яке називається тепловими втратами. Тепловиділення або втрати міді залежать від питомого опору та пропускну здатності провідника. Для трьохфазного генератора встати в міді знаходяться за формулою:

$$P_{\text{втрати}}^{Cu} = 3RI^2 = 3 \cdot 0,1037 \cdot 9,83^2 = 30,09 \text{ Вт} \quad (2.14)$$

Втрати в сталі заліза відбувається через вихрові струми, тому вони залежать від магнітного потоку.

$$P_{втрати}^{Fe} = k_h B_{\max}^2 f_{елект} + k_c B_{\max}^2 f_{елект}^2 + k_e B_{\max}^{3/2} f_{елект}^{3/2} = 3,26 Вт \quad (2.15)$$

де I - згенерований струм;

$B_{(max)}$ - максимальна густина магнітного потоку.

$$k_c = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6 \rho t} = 9,77 \cdot 10^{-5} \quad (2.16)$$

Загальні втрати в проектуваному генераторі рівні:

$$P_{втрати}^{загальні} = P_{втрати}^{Cu} + P_{втрати}^{Fe} = 33,35 Вт \quad (2.17)$$

На рис. 2.19 показано залежність між швидкістю вітру та втратами генератора. З графіка видно, що втрати прямо пропорційні швидкості вітру, втрати зростають зі збільшенням швидкості вітру.

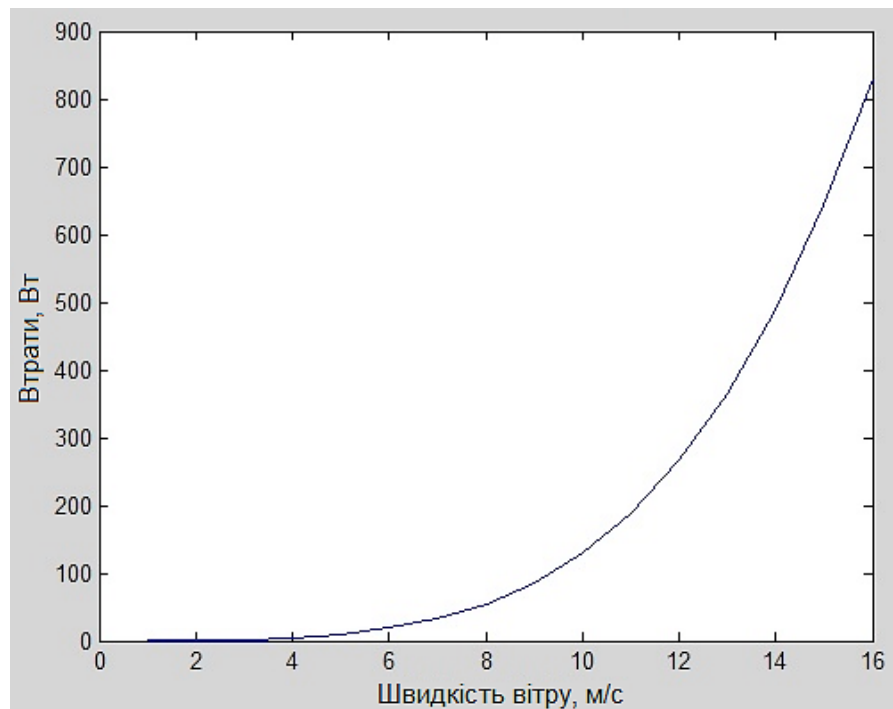


Рисунок 2.19 - Графік залежності загальних втрат від швидкості вітру

З врахуванням втрат, потужність генератора становить:

$$P_t = P_{\text{вітру}} - P_{\text{загальні втрати}} = 401,55 - 33,35 = 368,19 \text{ Вт} \quad (2.18)$$

Ефективність генератора,

$$\eta = \frac{P}{P + P_{\text{загальні втрати}}} = \frac{368,19}{368,19 + 33,355} = 91,7\% \quad (2.19)$$

Таблиця 2.2 - Розрахунок виробітку електроенергії, кількість годин/рік, річна енергія, що виробляється при різних швидкостях вітру

Швидкість вітру (м/с)	Потужність вітру (Вт)	Потужність з генератора (Вт)	Ймовірність заданої швидкості вітру	Кількість годин на рік (годин)	Щорічна генерація енергії (Вт/год)
1	1,17	0,81	0,015	131	0
2	9,37	8,41	0,021	184	0
3	3,61	29,39	0,031	272	7982,23
4	74,92	70,04	0,06063	531	37200,79
5	146,34	136,33	0,0832	729	99359,45
6	252,87	233,92	0,0992	869	203275,05
7	401,55	368,19	0,1073	940	346083,42
8	599,40	544,22	0,108	946	514873,97
9	853,44	766,76	0,1047	917	703252,23
10	1170,70	1040,29	0,092	806	838392,41
11	1558,20	1368,98	0,0787	689	943789,70
12	2022,97	1756,68	0,0641	562	986406,21
13	2572,03	2206,98	0,0477	418	922189,61
14	3212,40	2723,12	0,0382	335	911243,11
15	3951,11	3308,08	0,0227	199	657817,91
16	4795,18	3964,51	0,0192	168	666799,3854
> 17			0,00737	65	0

У таблиці 2.2 наведено повний огляд важливих параметрів вітрогенератора з вертикальною віссю. Таблиця показує потужність вітру і потужність на виході генератора при різних швидкостях вітру. Ця турбіна призначена для роботи при швидкості вітру від 3 м/с до 16 м/с. Стовбець «Ймовірність заданої швидкості вітру» дає нам ймовірність вітру протягом місяця або року. З доступності вітру (кількість годин) ми можемо отримати річний обсяг виробленої енергії.

2.8 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз конструкцій вітрогенераторів з вертикальною віссю. Обрано конструкцію для даної розробки.
2. Відповідно до умов експлуатації обрано геометричні розміри лопатей та ротора. Висота і ширина однієї лопаті 1,3 м і 0,9 м відповідно.
3. Наведено опис конструкції генератора на постійних магнітах у якого 32 неодимові магніти на роторах та 12 котушок (1200 витків) у статорі. З'єднання котушок – трифазне. Представлено схему розташування котушок та монтажу магнітів.
4. Представлено структурну схему трифазного випрямляча.
5. Проведено розрахунок залежності характеристик проектованої вертикально-осьової мікро-ВЕУ від швидкості вітру. А саме, визначено: енергію і потужність вітру; напругу, струм і частоту генератора; генеровану потужність із врахуванням втрат в генераторі.
6. В результаті розраховано кількість електроенергії яку може генерувати вертикально-осьова мікро-ВЕУ з врахуванням характеру зміни швидкості вітру.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційне моделювання вітрогенератора з вертикальною віссю

Для створення моделі вітротурбіни з вертикальною віссю використовувався інструмент моделювання MATLAB. Важливими підсистемами моделі ВЕУ є:

- Підсистема "Коефіцієнт потужності" (C_p).
- Підсистема коефіцієнта швидкості наконечника (λ).
- Підсистема механічного крутного моменту або потужності («Механічна потужність»).
- Підсистема генератора на постійних магнітах.

Підсистема коефіцієнта потужності (C_p).

Коефіцієнт потужності - це кількість енергії, яка може бути отримана від вітру. C_p моделюється за допомогою рівняння, записаного нижче,

$$C_p = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_1}} + C_6 \lambda \quad (3.1)$$

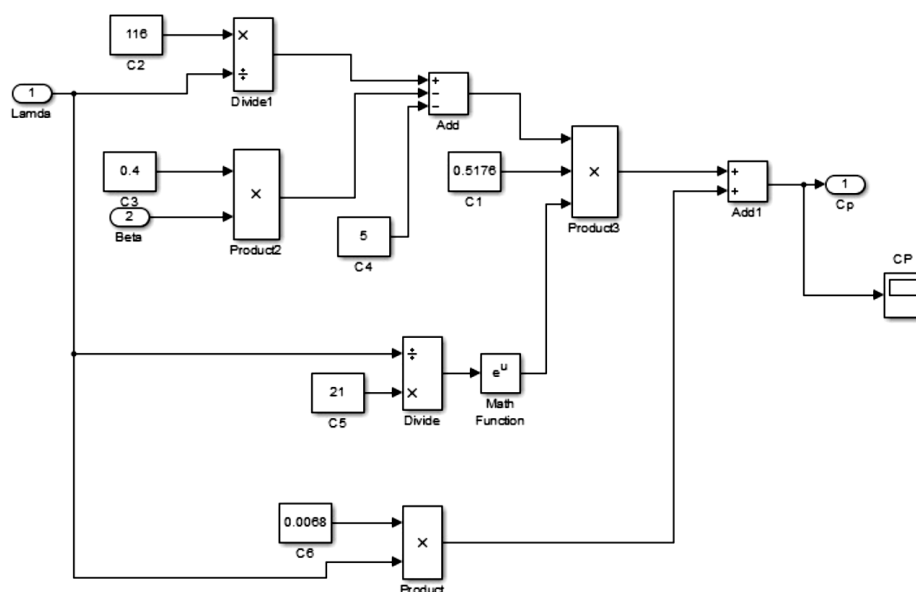


Рисунок 3.1 - Імітаційна модель для коефіцієнта потужності

Підсистема коефіцієнта швидкості наконечника (A)

TSR-система моделюється за допомогою рівняння, записаного нижче,

$$\lambda = \frac{R \cdot w}{v} \quad (3.2)$$

де v - швидкість вітру;

w - швидкість турбіни.

Підсистема механічного крутного моменту або потужності (підсистема VAWT)

Механічна підсистема живлення розраховується за допомогою рівняння, записаного нижче,

$$P_{mex} = \frac{1}{2} \cdot C_p \rho A_t v^3 \quad (3.3)$$

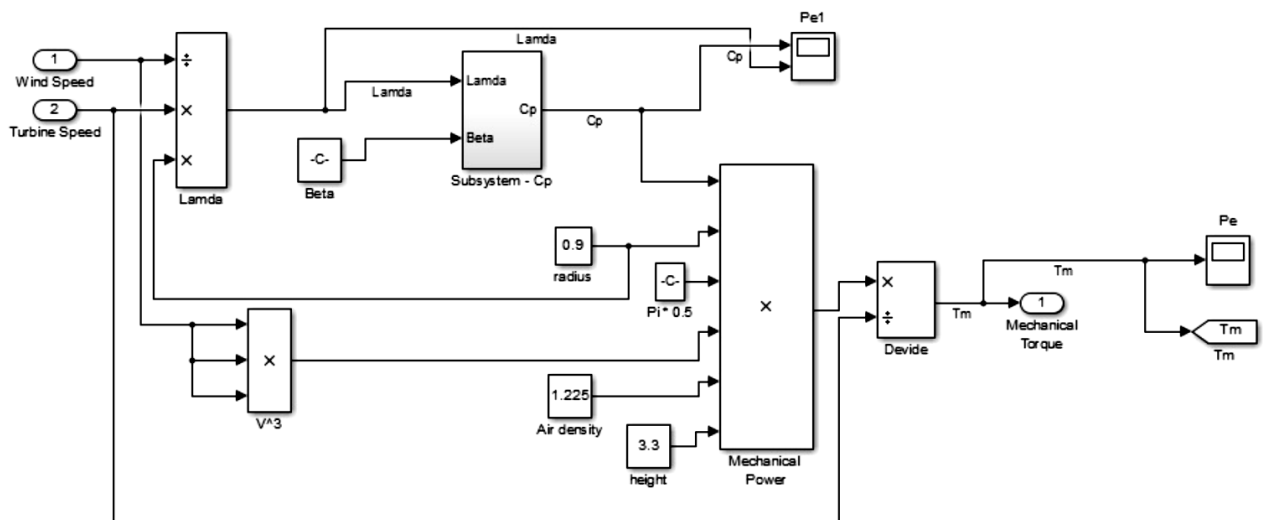


Рисунок 3.2 - Імітаційна модель для підсистеми механічної енергії

Підсистема генератора на постійних магнітах

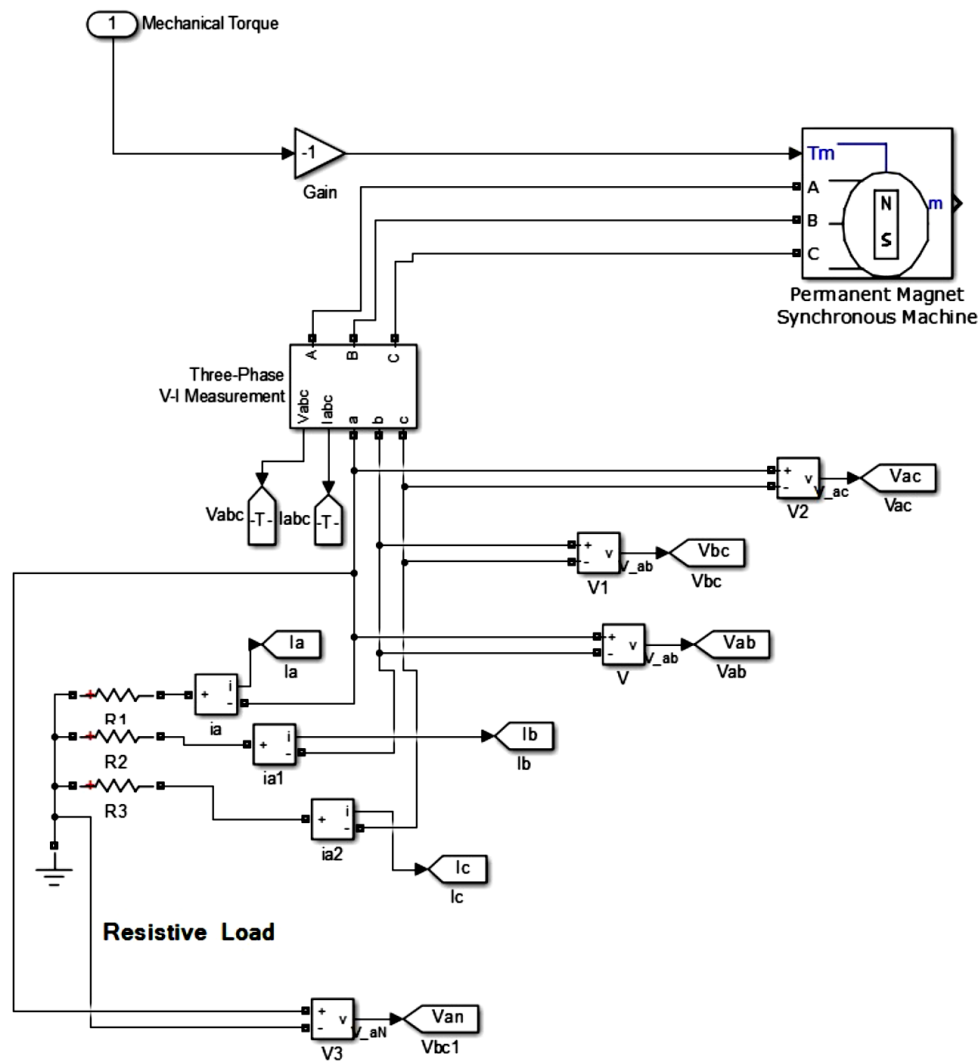


Рисунок 3.3 - Імітаційна модель підсистеми генератора ПМ

На рисунку вище показано імітаційну модель ПМ-генератора для VAWT. Механічний крутний момент подавався як вхідні дані з підсистеми «Механічна потужність». Генератору потрібен від'ємний крутний момент [18].

3.2 Результати моделювання

Розроблено імітаційну модель вітротурбіни з вертикальною віссю з урахуванням конструктивних параметрів. Результати моделювання проаналізовано для вдосконалення конструкції.

Крутний момент.

На рис.3.4 показано механічний крутний момент, що створюється підсистемою механічної потужності VAWT. Вироблений механічний крутний момент становить 398 Нм. Цей згенерований крутний момент подається на генератор ПМ для виробництва електроенергії.

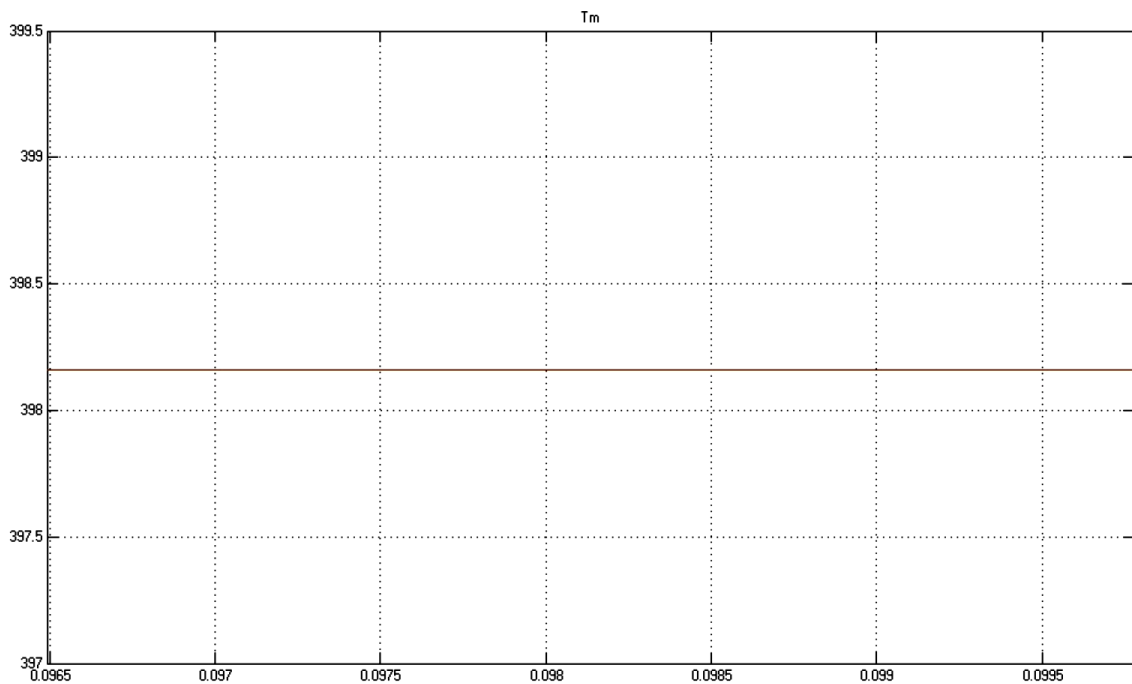


Рисунок 3.4 - Механічний крутний момент

Фазна та лінійна напруга

На рис.3.5 показано осцилограми фазної та лінійної напруги. З них видно, що VAWT генерує фазну напругу 12 В і лінійну напругу 21 В. На верхньому графіку показані всі 3-фазні напруги, ідеально збалансовані під кутом 120 градусів одна від одної.

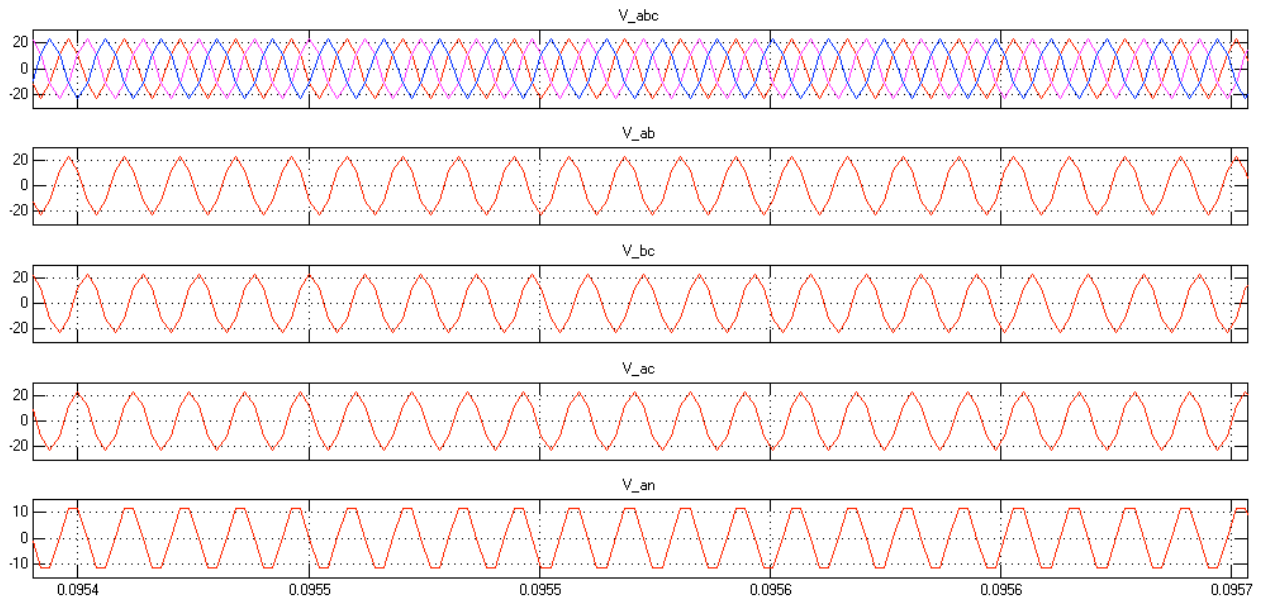


Рисунок 3.5 - Осцилограми вихідної напруги (V_{ab} , V_{bc} , V_{ac} – лінійна напруга, V_{an} – фазна),

Номінальний струм

На рис.3.6 показано осцилограми номінального струму. З них видно, що VAWT генерує номінальний струм 10,3 А. Верхній графік показує всі 3-фазні струми, ідеально збалансовані під кутом 120 градусів один від одного.

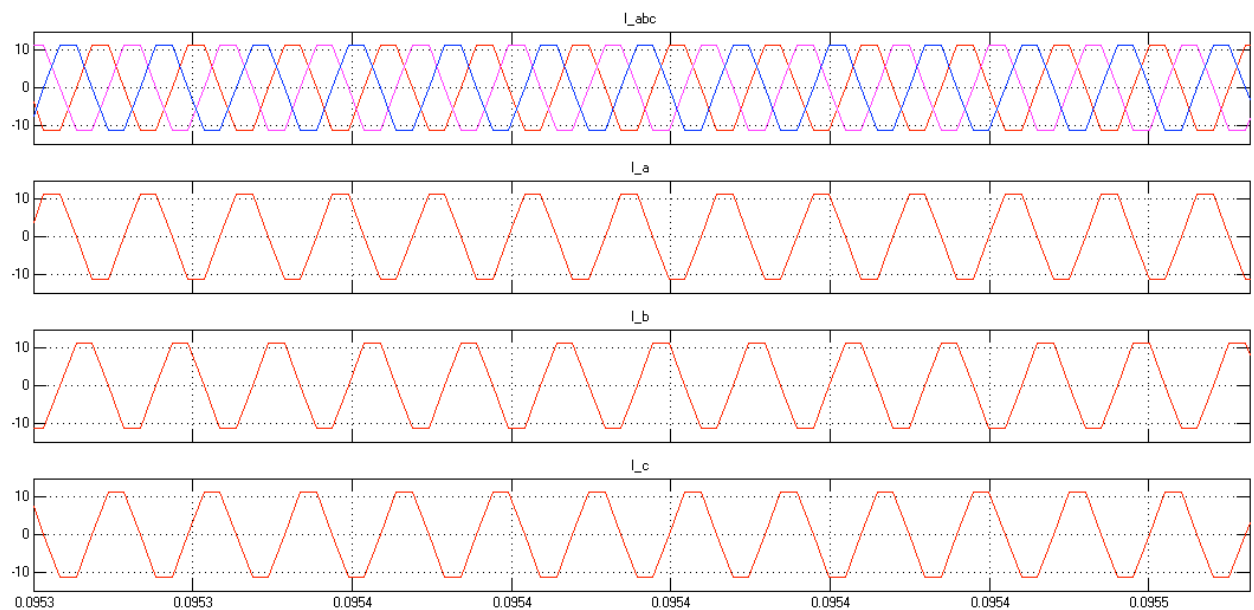


Рисунок 3.6 - Осцилограми номінального струму у кожній фазі

З обох форм сигналу ми можемо розрахувати загальну потужність, що генерується VAWT,

$$P = 3 \cdot V_{\text{фаза}} \cdot I, \quad (3.4)$$

$$P = 3 \cdot 12 \cdot 10,2 = 367,2 \text{ Вт}.$$

3.3 Обговорення результатів розрахунків та моделювання

Метою цієї роботи є розробка малої турбіни VAWT. Ці турбіни прості і потребують менших інвестицій. Впровадження вертикальних вітрових турбін на дорожніх розділювачах, узбіччях залізничних колій та для енергопостачання ізольованих територій було б великою перевагою, оскільки це зменшило б навантаження на споживання традиційних джерел енергії. Вони можуть бути встановлені на будь-якій автомагістралі, єдиним обмеженням є ширина. Оскільки розмір турбіни невеликий, вона може використовувати обмежену кількість вітру. Тому їх можна використовувати для вуличного освітлення на будь-якій жвавій дорозі та підсвічування рекламних щитів. Крім того, ці турбіни можуть знайти застосування для освітлення комерційних будівель. Іншим застосуванням може бути освітлення на автомагістралях, світлофорах, промислових об'єктах, просто в житлових кварталах.

Оскільки батарея портативна, ми можемо використовувати її в іншому місці для будь-яких низьковольтних цілей. Таким чином, існує баланс між вартістю та доступною потужністю. Нові тенденції в технологіях показали шлях до використання нетрадиційних джерел енергії настільки ефективно, що невеликі зусилля з боку можуть знайти ефективне рішення для буму електричної енергії в суспільстві.

Для того, щоб правильно спроектувати генератор, необхідно вивчити багато компонентів, таких як швидкість вітру, потужність, струм, напруга та багато інших. Для розрахунку важливих параметрів генератора було розроблено імітаційну модель в MATLAB з використанням усіх необхідних рівнянь (додаток А). Для створення цієї імітаційної моделі VAWT було

використано програмне забезпечення MATLAB Simulink. На основі розрухінків отримано осцилограми та точні дані. Вихідні осцилограми напруги та струму було проаналізовано та порівняно з розрахунковими значеннями.

У таблиці 3.1 наведено порівняння розрахункових значень та результатів моделювання в MATLAB для швидкості вітру 7 м/с. Після аналізу усіх цих значень можна зробити висновок, що дана модель VAWT є точною.

Таблиця 3.1 - Порівняльна таблиця

Параметри	Розраховане значення	MATLAB Моделювання
Фазна напруга (В)	13,60	12
Напруга лінійна (В)	23,56	21
Струм (А)	9,84	10,2
Потужність (Вт)	368,19	367,2
Втрати (Вт)	33,355	30,8
Ефективність (%)	91,69	92,2

3.4 Висновки до розділу

1. У середовищі MATLAB описано імітаційні моделі для визначення основних ключових показників. В результаті моделювання побудовано графіки зміни крутного моменту та змінної напруги та струму від генератора.
2. Розраховано потужність вертикально-осьового вітрогенератора.
3. Проведено порівняльний аналіз розрахункових значень та результатів моделювання в MATLAB для швидкості вітру 7 м/с. Після аналізу усіх цих значень можна зробити висновок, що дана імітаційна модель вертикально-осьового вітрогенератора є точною.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

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) [19]. 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 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [19].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (непризначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки, несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу характеру робіт, що виконуються;
- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;

- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. і відсутності під рукою засобів захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

4.3 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання

Для попередження про небезпеку застосовують звукові, світлові і кольорові сигнали. Сигнальні пристрої встановлюються в зонах видимості і слухового відчуття обслуговуючого персоналу. Сигнали небезпеки повинні чітко сприйматися у виробничій обстановці [19].

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

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

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

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

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

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

Розпізнавальне фарбування однойменних струмоведучих шин у кожній електроустановці приймається однаковим.

При змінному струмі фаза А фарбується в жовтий колір, фаза В - зелений, фаза С - червоний, нульова (при ізолюванні чи заземленій нейтралі) - в чорний; при однофазному струмі провідник, під'єднаний до початку обмотки джерела

живлення, - в жовтий, до кінця обмотки - в червоний; при постійному струмі позитивна фаза "+" - в червоний, негативна "-" – в синій, нейтральна - в білий.

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

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто типи вітрогенераторів. Окреслено переваги та недоліки вертикально-осьових і горизонтально-осьових.
2. Детально проаналізовано вертикально-осьові конструкції вітрогенераторів. Наведено приклад ефективного використання даного типу вітрогенератора на роздільній смузі автошляхів, де додатковий потік вітру створюється при русі авто.
3. Відповідно до умов експлуатації обрано геометричні розміри лопатей та ротора. Висота і ширина однієї лопаті 1,3 м і 0,9 м відповідно.
4. Наведено опис конструкції генератора на постійних магнітах у якого 32 неодимові магніти на роторах та 12 котушок (1200 витків) у статорі. З'єднання котушок – трифазне. Представлено схему розташування котушок та монтажу магнітів.
5. Проведено розрахунок залежності характеристик проекрованої вертикально-осьової мікро-ВЕУ від швидкості вітру. А саме, визначено: енергію і потужність вітру; напругу, струм і частоту генератора; генеровану потужність із врахуванням втрат в генераторі.
6. В результаті розраховано кількість електроенергії яку може генерувати вертикально-осьова мікро-ВЕУ з врахуванням характеру зміни швидкості вітру.
7. У середовищі MATLAB описано імітаційні моделі для визначення основних ключових показників. В результаті моделювання побудовано графіки зміни крутного моменту та змінної напруги та струму від генератора.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
3. 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
4. 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.
5. 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

6. 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.

7. Cooper, P., & Kennedy, O. (2004). Development and analysis of a novel vertical axis wind turbine.

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

10. Templin, R. J. (1974). *Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine* (No. N-76-16618; LTR-LA-160). National Aeronautical Establishment, Ottawa, Ontario (Canada).

11. 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.

12. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on

Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336

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

14. 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.

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

16. 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.

17. Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D., & Azevedo, G. (2009, July). Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In *2009 IEEE international symposium on industrial electronics* (pp. 734-739). IEEE.

18. 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. — (Прикладні застосування механіки в задачах енергозбереження)

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

Додаток А