

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка системи керування побутової вітроелектростанції

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2 курсу група ЕТм-23-1


Підпис

Токарчук Є.О.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник _____
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Смутко С.В.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер К.П.Н. ДОУСНЯ
Доцента


Підпис

Тимошук О.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри _____
Назва


Підпис

Неймак В.С.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

17.12.2024
Дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

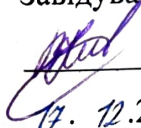
Шифр і назва

Спеціалізація Електропобутова техніка

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС


17. 12.2024

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Токарчук Єгор Олегович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи керування побутової вітроелектростанції

керівник роботи Смутко Світлана Валеріївна

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 16 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики силового обладнання та мережі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Огляд та аналіз конструкцій вітроелектростанції. 2 Розробка

системи керування побутової вітроелектростанції. 3 Класифікація, стратегії

та моделювання систем керування. 4 Розрахунок навантаження на систему

Висновки. Перелік посилань .

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1. <u>Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень в області вітрогенераторів</u>		
2. <u>Розробка системи керування побутової вітроелектростанції</u>		
3. <u>Розрахунок навантаження на систему</u>		
4. <u>Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу</u>		

Студент

Підпис

Є.О. Токарчук
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

С.В. Смутко
Ініціали, прізвище

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Токарчук Єгор Олегович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

Тема роботи Розробка системи керування побутової
вітроелектростанції

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____

2. Обсяг магістерської роботи: креслень _____ арк, сторінок записки _____

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

Проведено огляд та аналіз конструкцій в області вітроелектростанцій.

Описується загальна відомість в сфері вітроенергетики та проблеми в
експлуатації промислових установок. Розглядається конструкція вертикального

типу та її будова. Проводиться аналіз системи керування вітроелектростанціями.

Представлено алгоритм розробленої системи керування вітрогенератором у

Simulink. На основі аналізувань результатів показано залежність потужності від

швидкості вітру та кута атаки. Ця система працює стабільно в області, що

перевищує номінальну швидкість вітру.

Підпис студента _____

" 17 " 12 2024 р.

Р І Ш Е Н Н Я Е К ЗА М Е Н А Ц І Й Н О Ї К О М І С І Ї:

Протокол 5 від 27 12 2024 р.

Оцінка роботи ЕК Відмінно 1.0

Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

Підпис

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 27 " 12 2024 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	5
1 Огляд та аналіз конструкцій вітроелектростанції.....	7
1.1. Альтернативна енергетика.....	7
1.2 Конструктивні особливості вітроелектростанцій	11
1.3 Система керування вітроелектростанцією.....	16
1.4 Висновок до першого розділу.....	24
2 Розробка системи керування побутової вітроелектростанції	25
2.1 Розробка алгоритму керування вітроелектростанцією.....	25
2.2 Розробка блок схеми моделювання системи вітроелектростанції.....	33
2.3 Висновок до другого розділу.....	36
3 Класифікація, стратегії та моделювання систем керування.....	37
3.1 Класифікація системи керування вітрогенераторів.....	37
3.2 Стратегії керування вітрогенератором	40
3.3 Моделювання системи вітрогенератора	48
3.4 Математична модель синхронного генератора з постійними магнітами....	51
3.5 Висновки до розділу.....	55
4 Розрахунок навантаження на систему	57
4.1 Регулятор для керування струмом генератора	57
4.2 Розробка спостерігача крутного моменту	62
4.3 Висновки до розділу.....	66
Висновки.....	67
Перелік джерел посилання.....	68
Додаток А.....	70

МРМА 24.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Гокарчук	<i>[Signature]</i>		Розробка системи керування побутової вітроелектростанції	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>			б	4	
Н.контр.		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>		ХНУ г.в. ЕТМ-23-1			
Затвер.		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>					

розділу.....					
4	Розрахунок	навантаження	на	систему	57
.....					
4.1	Регулятор	для	керування	струмом	генератора 57
.....					
4.2	Розробка	спостерігача	крутного	моменту	62
.....					
4.3		Висновки		до	66
розділу.....					
	Висновки.....				67
	Перелік			джерел	68
посилання.....					
	Додаток А.....				70

ВСТУП

В даний час проблеми, пов'язані з охороною навколишнього середовища, особливо глобальне потепління, посилюються, що призводить до використання відновлюваних джерел енергії. Енергія вітру є одним з основних гравців в цьому контексті і на сьогоднішній день є найбільш поширеним поновлюваним видом палива. Однак використання енергії вітру з високою ефективністю вимагає ряду технічних удосконалень, таких як системи управління вітроелектростанціями.

Останнім часом вітроенергетика набула великого значення. Це стосується як практичного використання, так і наукових експериментів та розробок у застосуванні енергії вітру.

В умовах сучасної економіки, коли світові енергетичні ресурси поступово виснажуються, а атмосфера стає все більш забрудненою, стає актуальним використання альтернативних джерел енергії, які досі не розглядалися. Вчені підрахували, що через 150 років торф залишиться єдиним викопним джерелом енергії на Землі. За прогнозами, до 2051 року всі відомі запаси нафти будуть виснажені, до 2065 року зникне уран, до 2081 року буде спалений останній кубометр газу, а до 2135 року - деревне вугілля [6]. У цій ситуації відкриваються всі можливі можливості для впровадження і використання передових технологій, що забезпечують доступ до економічно вигідного і екологічно чистого палива. Джерела енергії будуть реалізовані. Важливо буде розробити та використовувати ці інструменти.

У зв'язку з цим основна увага приділяється використанню відновлювальних джерел енергії в сільському господарстві, на виробництві і в повсякденному житті.

Варто також відзначити, що альтернативна енергетика - це високотехнологічна галузь, що вимагає значних наукових і технологічних ресурсів. Недавні дослідження відкрили перспективи використання

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

альтернативних джерел енергії і показують, що енергія вітру є найбільш ефективною і широко використовуваною в Україні.

Вітрові електростанції не потребують палива або води і можуть бути повністю автоматизовані. Сучасна вітроенергетика вже є невід'ємною частиною енергетичної системи багатьох розвинених країн світу [3].

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 Огляд та аналіз конструкцій вітроелектростанції

1.1 Альтернативна енергетика

Альтернативна енергетика є однією з найбільш актуальних тем сучасного світу, оскільки традиційні джерела енергії, такі як вугілля, нафта та природний газ, спричиняють забруднення навколишнього середовища та мають обмежені ресурси. В умовах глобальних екологічних проблем, зокрема зміни клімату, важливість переходу на альтернативні джерела енергії стає очевидною. Відновлювальні джерела енергії, серед яких сонячна, вітрова, гідроенергія, геотермальні ресурси та біоенергетика, є перспективними варіантами для зменшення залежності від викопних енергоресурсів.

Сонячна енергетика займає одне з провідних місць серед альтернативних джерел енергії. Вона використовує енергію Сонця для виробництва електричної енергії або тепла. За допомогою сонячних батарей, які перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію, можна живити різні пристрої або ціле житлове чи промислове господарство. Сонячні колектори використовуються для нагрівання води або повітря [1]. Цей вид енергетики має величезний потенціал, оскільки Сонце є безкоштовним, майже невичерпним ресурсом, а сама технологія стає все доступнішою завдяки зниженню вартості виробництва сонячних панелей.

Вітрова енергетика, в свою чергу, використовує силу вітру для виробництва електричної енергії через вітрові турбіни. Вітрові електростанції можуть бути розташовані як на суші, так і на морі, що дозволяє ефективно використовувати природні ресурси в багатьох регіонах світу. Вітрова енергія є одним із найбільш чистих і безпечних джерел енергії, оскільки в процесі її використання не викидаються шкідливі гази, а самі станції займають мінімум площі, не завдаючи значної шкоди навколишньому середовищу.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Гідроенергетика використовує енергію потоку води для генерації електричної енергії, перетворюючи механічну енергію водяного потоку у електричну через водяні турбіни. Гідроелектростанції існують уже багато десятиліть і є одним із найбільш надійних і стабільних джерел енергії. Однак будівництво великих гідроелектростанцій часто пов'язане з негативними екологічними наслідками, такими як зміни екосистем і вплив на місцеву флору та фауну. Водночас дрібні гідроелектростанції можуть мати менший екологічний вплив і є ефективними в певних регіонах.

Геотермальна енергетика, що використовує тепло Землі для виробництва енергії, також має значний потенціал. Тепло, яке виділяється з надр Землі через геотермальні джерела та вулканічні процеси, може використовуватися для опалення будівель або для генерації електричної енергії. Така енергетика має стійкий характер, оскільки Земля постійно виділяє тепло, однак геотермальні ресурси ефективні лише в певних географічних районах, таких як вулканічні зони.

Біоенергетика використовує органічні матеріали, такі як деревина, аграрні відходи, а також біогаз, для отримання енергії [9]. Цей процес може включати спалювання біомаси для генерації тепла чи електрики або виробництво біогазу, який також використовується як паливо. Біоенергетика має кілька переваг, зокрема зменшення обсягів органічних відходів і їх переробка в корисний продукт. Проте цей вид енергетики потребує ретельного управління ресурсами, щоб не завдати шкоди навколишньому середовищу.

Попри численні переваги альтернативної енергетики, існують і певні труднощі, пов'язані з її впровадженням. Наприклад, високі початкові витрати на інфраструктуру для використання відновлювальних джерел енергії, а також залежність від погодних умов, таких як кількість сонячних днів або швидкість вітру, можуть бути обмеженнями для широкого використання цих технологій. Однак розвиток технологій зберігання енергії, зокрема акумуляторних систем, дозволяє зменшити залежність від непостійних природних ресурсів.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Перспективи розвитку альтернативної енергетики виглядають оптимістично, адже інновації в технологіях і постійне зниження вартості обладнання роблять відновлювальні джерела енергії більш доступними для широкого використання. Крім того, держави світу активно підтримують цей сектор через субсидії та законодавчі ініціативи, спрямовані на зниження викидів парникових газів та стимулювання інвестицій в екологічно чисті технології.

Альтернативна енергетика, без сумніву, є важливим кроком у напрямку сталого розвитку, що дозволяє зменшити екологічне навантаження на планету та забезпечити енергетичну безпеку для майбутніх поколінь.

Альтернативна енергетика — це не просто заміна традиційних джерел енергії, а й важливий етап у розвитку нової енергетичної моделі, яка орієнтується на сталий розвиток і збереження екосистеми планети [7]. Сьогодні перехід до відновлювальних джерел енергії стає необхідністю, адже викопні ресурси невичерпні, а їх видобуток та споживання завдають серйозної шкоди навколишньому середовищу. Зміна клімату, забруднення атмосфери, глобальне потепління — ці проблеми стають все більш очевидними, і боротьба з ними потребує радикальних змін у підходах до енергозабезпечення.

Один із важливих аспектів альтернативної енергетики — це її екологічна безпека. Використання відновлювальних джерел енергії, таких як сонце, вітер, вода та біомаса, не призводить до викидів парникових газів, що є основними причинами глобального потепління. Сонячні і вітрові електростанції, на відміну від традиційних ТЕС і АЕС, не забруднюють повітря, не викидають токсичні речовини в атмосферу і не сприяють утворенню кислотних дощів. Крім того, багато з цих джерел енергії є вкрай надійними і здатні забезпечити стабільний потік енергії без негативних впливів на природні ресурси.

Завдяки своїй природній відновлюваності, альтернативні джерела енергії можуть стати основою для енергетичної безпеки держав і регіонів. Вони дозволяють знизити залежність від імпортованих викопних енергоносіїв, що особливо важливо для країн, що не мають значних запасів нафти чи газу.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Наприклад, країни з розвинутою сонячною або вітровою інфраструктурою можуть суттєво знизити свої енергетичні витрати і підвищити енергетичну незалежність. Така ситуація дає змогу уникнути економічних і політичних ризиків, пов'язаних з імпортом енергоносіїв з нестабільних регіонів світу.

Одним із ключових аспектів розвитку альтернативної енергетики є технологічний прогрес. Наприклад, розвиток акумуляторних технологій дозволяє зберігати енергію, вироблену сонячними та вітровими станціями, і використовувати її вночі або в періоди слабкого вітру. Раніше однією з найбільших проблем альтернативної енергетики була нестабільність постачання енергії через залежність від погодних умов. Сучасні технології, такі як вдосконалені сонячні панелі, гібридні системи, вітрові турбіни з більш високою ефективністю, а також розширене використання акумуляторних систем, дозволяють значно поліпшити ситуацію.

Крім того, зростаюча увага до екологічних проблем і зміни клімату сприяє розвитку нових форм енергетики [5]. Наприклад, досліджуються методи використання морських хвиль і приливів для виробництва електричної енергії. Технології, які дозволяють витягувати енергію з океанських хвиль, ще знаходяться на стадії розробки, однак потенціал цього напрямку є величезним. Подібні технології можуть стати важливою частиною енергетичного ландшафту майбутнього, особливо для прибережних країн, які мають вихід до морів і океанів.

Також важливим аспектом є соціальний та економічний вплив альтернативної енергетики. Підвищення популярності відновлювальних джерел енергії сприяє створенню нових робочих місць, розвитку нових галузей промисловості, інвестиціям у технології та інфраструктуру. Крім того, розширення виробництва «зеленої» енергії стимулює економічний розвиток регіонів, що спеціалізуються на виробництві енергетичних компонентів і обладнання.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Проте альтернативна енергетика стикається і з деякими труднощами, зокрема високими початковими витратами на будівництво та інсталяцію енергетичних установок. Вартість сонячних батарей, вітрових турбін і гідроелектростанцій може бути високою, а також існують певні технологічні обмеження для їх ефективного використання. Однак з часом, завдяки розвитку технологій і збільшенню масштабів виробництва, ці витрати поступово знижуються.

Перехід до альтернативних джерел енергії також потребує змін у політичних, економічних і соціальних структурах. Необхідно створити відповідну законодавчу базу, яка стимулюватиме інвестування в «зелену» енергетику, а також проводити освітні кампанії для громадськості, щоб підвищити обізнаність про переваги відновлювальних джерел енергії.

Альтернативна енергетика — це не лише енергетична інновація, але й важливий елемент глобальних змін, що сприятимуть збереженню екосистеми нашої планети. Її розвиток є важливим кроком до забезпечення сталого майбутнього, як для економік окремих країн, так і для всієї Землі.

Таким чином, альтернативна енергетика є важливим елементом стратегії сталого розвитку, що сприяє не лише збереженню природних ресурсів, але й зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище [2]. Хоча цей сектор стикається з певними викликами, такими як високі початкові витрати та залежність від погодних умов, перспективи його розвитку виглядають обнадійливо. Інвестиції в технології відновлювальних джерел енергії, впровадження інновацій та зміни в політиці сприятимуть поступовому переходу до «зеленої» енергетики, яка може стати основою для енергетичної незалежності та екологічної безпеки. Альтернативна енергетика відкриває нові горизонти для економічного та соціального розвитку, допомагаючи людству зробити важливий крок до більш чистого та сталого майбутнього.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1.2 Конструктивні особливості вітроелектростанцій

Вітрогенератори з горизонтальною віссю (ВГВ) є найпоширенішим типом вітрогенераторів у комерційному масштабі (рис.1.1, аркуш [МРМА23.00.00.000 ДО]). Вони мають вісь обертання лопатей, розташовану горизонтально, перпендикулярно до напрямку вітру. Вісь обертання зазвичай розташована на вершині високої башти, а лопаті розташовані нижче.



Рисунок 1.1 - Вітряк Green Powe SE 500

Основні компоненти конструкції вітрогенератора з горизонтальною віссю включають:

- ротор складається з трьох лопатей, які приймають енергію вітру. Лопаті зазвичай мають аеродинамічну форму для оптимального збору енергії вітру. Коли вітер дме на лопаті, вони починають обертатись [17];
- генератор активує обертання лопатей, який перетворює механічну енергію від ротора на електричну енергію. Генератори зазвичай

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
13

використовуються на основі синхронних генераторів або асинхронних генераторів з системою управління електричним струмом;

- башта вітрогенератора підтримує ротор і генератор на певній висоті над землею. Вона може бути зроблена зі сталі, бетону або інших матеріалів. Висота башти може варіюватись від декількох десятків метрів до сотень метрів, залежно від розмірів вітрогенератора і умов встановлення;

- керування і управління вітрогенератори мають ці системи, які регулюють швидкість обертання ротора в залежності від швидкості та напрямку вітру. Це допомагає забезпечити оптимальну роботу вітрогенератора і захистити його від перевантажень та пошкоджень.

Вітрогенератори з горизонтальною віссю мають декілька переваг порівняно з вітрогенераторами з вертикальною віссю. Перше, вони відзначаються високою ефективністю, що означає, що вони можуть виробляти більше електроенергії при однакових вітрових умовах. Друге, вони можуть працювати в широкому спектрі вітрових умов, що робить їх універсальними і придатними для різних місцевостей та кліматичних умов.

Вітрогенератори з вертикальною віссю (ВВВ) відрізняються від вітрогенераторів з горизонтальною віссю конструкцією та принципом роботи (рис. 1.2). Вони мають вертикально розташовану ось обертання лопатей, що дає їм інші характеристики та переваги.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 – Вітряк UA Winds

Основні типи конструкцій вітрогенераторів з вертикальною віссю включають:

- савоніусовий ротор: Цей тип ВВВ має форму як двох напівкілець, розташованих проти один одного. Лопаті мають форму вигнутих півкілець і працюють на принципі повітряного опору. Савоніусові ротори працюють ефективно при низьких швидкостях вітру, але мають меншу коефіцієнт використання вітру порівняно з іншими конструкціями;

- дар'єсовий ротор: Цей тип ВВВ складається з набору вертикальних лопатей, розташованих у вигляді перехресного хреста. Лопаті мають аеродинамічну форму, що забезпечує ефективніше збір енергії вітру [16]. Дар'єсові ротори можуть працювати ефективно при широкому діапазоні швидкостей вітру;

- вертикальний вітрообмінник: Це специфічний тип ВВВ, який складається з набору вертикальних лопатей, розташованих по висоті. Кожна лопасть має спеціальну форму, яка створює вихровий потік повітря, що забезпечує збільшення продуктивності системи.

Переваги вітрогенераторів з вертикальною віссю включають:

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- здатність працювати при змінному та непостійному напрямленні вітру;
- можливість встановлення на обмеженому просторі, так як вони не потребують орієнтації по напрямку вітру;
- менша чутливість до турбулентності вітру.

Проте, ВВВ також мають свої обмеження, які слід враховувати. Один з них нижчий коефіцієнт ефективності порівняно з вітрогенераторами з горизонтальною віссю. Це означає, що ВВВ можуть генерувати менше електроенергії при тих самих вітрових умовах.

Крім того, використання ВВВ також вимагає більших вимог до конструкції та установки. Їх потрібно встановлювати у спеціально призначених місцях з міцними опорами, що може бути складним та дорогим процесом [4].

Тому використання ВВВ ширше застосовується в невеликих масштабах (рис. 1.3), зокрема в міських середовищах та для побутових застосувань, де вимоги до потужності не настільки високі, а можливість їх інтеграції з міською інфраструктурою має велике значення.



Рисунок 1.3 - Вітряк FlySky SW 800

Основні характеристики та переваги вітрогенераторів з вертикальною віссю включають:

- орієнтаційна незалежність: ВВВ не потребують активного слідкування за напрямком вітру, оскільки їх лопаті можуть працювати в будь-якому напрямку вітру. Це робить їх ефективними в умовах змінного та непостійного напрямку вітру;
- менша чутливість до турбулентності: ВВВ можуть працювати ефективно навіть в умовах турбулентного вітру, так як їх конструкція дозволяє їм краще переносити зміни швидкості та напрямку вітру;
- менша вимога до висоти башти: ВВВ можуть бути встановлені на нижчих баштах, оскільки їх конструкція не вимагає підйому лопатей на велику висоту. Це зменшує витрати на будівництво та установку;
- менше впливу на птахів та ландшафт: ВВВ мають менший вплив на птахів та ландшафт, оскільки їх лопаті рухаються вздовж вертикальної осі, що зменшує ризик зіткнення з птахами та не вимагає великих вільних просторів для обертання.

Тому ВВВ частіше використовуються в невеликих масштабах, зокрема в міських середовищах та для побутових застосувань, де вимоги до потужності не настільки високі, а можливість їх інтеграції з міською інфраструктурою має велике значення.

1.3 Система керування вітроелектростанцією

Необхідність управління виникла ще на зорі створення вітрогенераторів. Основними цілями управління були обмеження потужності та швидкості до деяких заданих значень для запобігання небезпечній роботі вітрогенератора в умовах сильного вітру. Колишні конструкції вітрогенераторів включали примітивні механічні пристрої для досягнення цих цілей. Зі збільшенням розмірів і потужності вітрогенераторів, технічні вимоги до систем управління

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ставали дедалі жорсткішими, а механізми регулювання - дедалі складнішими. Дедалі частіше від систем управління очікували не тільки підтримання турбіни в безпечній робочій області, а й підвищення ефективності та якості перетворення енергії. У результаті вони поступово розвивалися, поки сьогодні не стали відігравати вирішальну роль у сучасних вітрогенераторах.

Розроблення системи керування вітрогенератором може бути розділене на кілька етапів [12].

Перше завдання полягає в чіткому визначенні цілей управління.

Другим завданням є вибір відповідної стратегії управління, що визначає робочу точку вітрогенератора для кожної швидкості вітру.

Третє завдання вирішує, як буде реалізована стратегія управління. Воно охоплює вибір схем керування, керованих змінних, опорних сигналів, процедури перемикавання між різними контролерами тощо.

Цей етап зазвичай називають налаштуванням контролера. Нарешті, останнім завданням, що передує реалізації, є проектування карти вхід-вихід, тобто динамічних характеристик контролера відповідно до специфікації. У цьому розділі розглядаються перші два етапи розроблення системи керування, тоді як налаштування і проектування контролера залишено для наступних розділів.

Розробка починається з викладу загальних цілей управління вітрогенераторами. Потім, вітрогенератори класифікуються на чотири категорії відповідно до їхніх режимів роботи. Розділ продовжується описом основних стратегій управління, традиційно використовуваних для кожної з цих груп. Далі представлено деякі альтернативи та модифікації цих базових стратегій.

Цілі керування:

Вітрогенератор є пристроєм, що вловлює частину енергії вітру і перетворює її в корисну енергію. Особливо вітрогенератор, що під'єднується до електричних мереж, має бути спроектований для мінімізації вартості енергії, що

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

постачається, забезпечуючи безпечну експлуатацію, а також дотримання стандартів акустичної емісії та якості електроенергії.

Мінімізація вартості енергії містить у собі низку приватних цілей. Насправді ці цілі тісно пов'язані й іноді суперечать одна одній. Тому вони не повинні переслідуватися окремо [13]. Навпаки, питання полягає в тому, щоб знайти добре збалансований компроміс між ними. Ці часткові цілі можна розташувати за такими темами:

- уловлювання енергії: Максимізація уловлювання енергії з урахуванням обмежень безпечної експлуатації, як-от номінальна потужність, номінальна швидкість, швидкість вітру під час вимкнення тощо;

- механічні навантаження: Запобігання надмірним динамічним механічним навантаженням на вітрогенератор. Ця загальна мета містить пом'якшення перехідних навантажень, пом'якшення високочастотних навантажень і запобігання резонансу;

- якість електроенергії: Забезпечення відповідності енергії, що виробляється, стандартам міжмережевої взаємодії;

Уловлювання енергії:

Для вітряної турбіни генераторна потужність визначає обсяг енергії, який може бути витягнутий з вітру з урахуванням фізичних та економічних обмежень. Зазвичай вона представлена у вигляді кривої на площині генерована потужність - швидкість вітру, так званої кривої ідеальної потужності.

На рисунку 1.4 показано криву максимальної потужності для стандартної вітряної турбіни. Видно, що діапазон робочих швидкостей вітру обмежений швидкостями вітру на вході (V_{min}) і виході (V_{max}). За цими межами турбіна залишається зупиненою. Нижче за швидкість вітру на вході доступна енергія вітру занадто мала, щоб компенсувати експлуатаційні витрати і втрати. За швидкості вітру, що перевищує швидкість вимкнення, турбіна відключається, щоб запобігти перевантаженню конструкції.

Будівництво турбіни, досить міцної для того, щоб витримати основні механічні навантаження при дуже сильному вітрі, було б абсолютно нерентабельним. Насправді незважаючи на те, що швидкість вітру вище V_{max} містить величезну енергію, її внесок у середньорічну енергію мізерно малий. Це підтверджує рисунок 1.5, де показано типову функцію щільності потужності на цій ділянці. Там видно, що енергія, яка залишається не вловленою через зупинку турбіни за межами меж швидкості вітру V_{min} і V_{max} , порівняно мала [20].

На рисунку 1.4 також можна відзначити, що крива максимальної потужності залишається сталою за номінальної потужності P_N , яка вища за швидкість вітру V_N , названу номінальною швидкістю вітру V_N . Номінальна потужність турбіни виникає в результаті компромісу між доступною енергією та виробничими витратами.

Наприклад, проектування турбіни для вилучення всієї доступної енергії аж до швидкості вітру до відсічення призведе до збільшення вартості одного кВт. Насправді, швидкість вітру вище V_N зустрічається недостатньо часто, щоб виправдати додаткові розміри турбіни, необхідні для отримання енергії, вищою за номінальну.

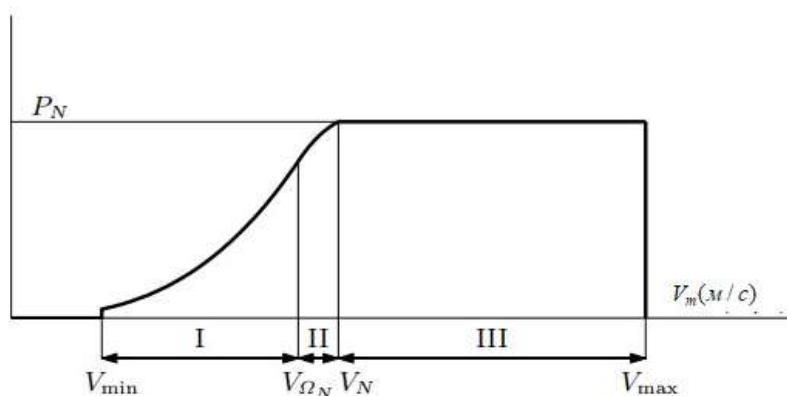


Рисунок 1.4 - Крива максимальної потужності

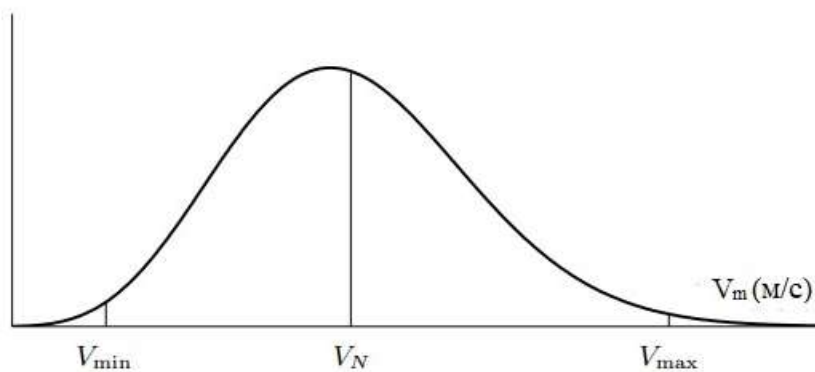


Рисунок 1.5 - Щільність потужності залежно від швидкості вітру.

Крива максимальної потужності являє собою три різні регіони з різними цілями генерації. За низької швидкості вітру (регіон I) доступна потужність нижча за номінальну.

Доступна потужність визначається як потужність вітру, що проходить через площу ротора, помножена на коефіцієнт максимальної потужності:

$$P_m = 0.5 \cdot \rho \pi R^2 V_w^2 C_p(\lambda \beta), \quad (1.1)$$

де P_m - отримана механічна потужність турбіни, Вт;

V_w - швидкість вітру, м/с;

C_p - коефіцієнт використання енергії вітру;

R - радіус ротора, м;

ρ - густина повітря, кг/м³ ;

λ - коефіцієнт крутного моменту;

β - кут нахилу лопатей, град.

Таким чином, метою виробництва в регіоні I є вилучення всієї доступної потужності. Тому крива максимальної потужності в цьому регіоні відповідає кубічній параболі, що визначається за формулою (1.1).

З іншого боку, метою виробництва в регіоні з високою швидкістю вітру (регіон III) є обмеження генерованої потужності нижче номінального значення, щоб уникнути перевантаження. У цьому регіоні доступна потужність

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

перевищує номінальну, тому турбіна повинна працювати з ККД нижче Ср. Нарешті, існує область II, яка фактично є перехідною між кривою оптимальної потужності області I і лінією постійної потужності регіону III. У цій області швидкість обертання ротора обмежується для підтримання акустичного шуму в межах допустимих рівнів і для підтримання відцентрової сили нижче значень, допустимих для ротора. У кінцевому підсумку в разі, якщо таке обмеження швидкості не досягнуто, регіон II може не існувати, а крива оптимальної потужності (тобто регіон I) може тривати до досягнення номінальної потужності.

Механічні навантаження:

Мінімізація витрат на електроенергію робить систему управління не тільки розробленою для якомога точнішого відстеження кривої максимальної потужності [19]. На практиці не повинно бути ігнорування інших цілей управління. Наприклад, необхідно враховувати механічні навантаження, яких зазнають вітряні турбіни. Механічні навантаження можуть спричинити втомне пошкодження декількох пристроїв, тим самим скорочуючи термін служби системи. Оскільки загальна вартість вітрогенератора розподіляється на більш короткий період часу, вартість енергії зростатиме.

Здебільшого існує два типи механічних навантажень, тобто статичні та динамічні. Статичні навантаження виникають у результаті взаємодії турбіни із середньою швидкістю вітру. Набагато більш важливими з погляду управління є динамічні навантаження, які спричиняються просторовим і часовим розподілом поля швидкості вітру на площі, що обтікається ротором. Динамічні навантаження включають в себе зміни чистого аеродинамічного моменту, які поширюються вниз по трансмісії, і зміни аеродинамічних навантажень, які впливають на механічну конструкцію. Це так звані навантаження на трансмісію і конструкцію, відповідно.

Крім того, існує ще одна поширена класифікація динамічних навантажень. Спочатку існують перехідні навантаження, які спричиняються

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

турбулентністю та поривами. Вони мають переважно низьку частоту. Перехідні навантаження мають дуже важливе значення за високих швидкостей вітру, особливо для визначення номінальних характеристик компонентів. Перехід між відстеженням максимальної потужності (регіон I) і регулюванням потужності (регіон III), а також спосіб обмеження потужності за швидкості вітру, що вища за номінальну, безпосередньо впливають на перехідні навантаження. Невідповідні стратегії управління можуть неминуче призвести до сильних перехідних навантажень.

Тому під час планування стратегії управління необхідно враховувати і їх. Крім того, налаштування і конструкція контролера також впливають на перехідні навантаження. Фактично, чим щільніше замкнута система слідує кривій стратегії управління в стаціонарному режимі після пориву вітру, тим сильнішими будуть перехідні навантаження.

Якість електроенергії:

Якість електроенергії впливає на вартість енергії кількома способами. Наприклад, низька якість електроенергії може зажадати додаткових інвестицій у лінії електропередач або накласти обмеження на потужність, що поставляється в мережу. Через довгострокову і короткострокову мінливість енергоресурсу і взаємодії з електромережею вітрогенератори традиційно вважаються постачальниками електроенергії низької якості.

Тому під час проєктування системи управління необхідно також враховувати кондиціонування потужності. Ця вимога до управління стає дедалі актуальнішою в міру того, як масштаб потужності вітрогенерувальних установок наближається до потужності звичайних електростанцій. Якість електроенергії здебільшого оцінюють за стабільністю частоти і напруги в точці підключення до мережі та за емісією флікера.

Загалом, частота є стабільною величиною. Коливання частоти в електричній мережі відбуваються через дисбаланс потужності. Наприклад, генератори прискорюються, коли потужність, що постачається, перевищує

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

споживану, отже, частота збільшується. Аналогічно, генератори сповільнюються, коли вони не можуть покрити попит на потужність, тим самим частота знижується. Зазвичай при підключенні до загальної мережі поодинокі вітряні турбіни або невеликі вітропарки не впливають на частоту. Однак це не так, коли вітряна турбіна є частиною ізольованої енергосистеми або коли, ми маємо справу з великою вітряною електростанцією. У цих випадках може виникнути ситуація, коли необхідно регулювати загальну потужність, яку постачає вітрогенератор [11].

Взаємодія вітрогенераторів з електричною мережею впливає на напругу на терміналах мережі. Наприклад, повільні коливання напруги відбуваються, коли потужність, споживана вітрогенератором, змінюється залежно від середньої швидкості вітру. Амплітуда цих коливань тісно залежить від опору мережі в точці підключення і від потоків активної та реактивної потужності. Спосіб послаблення цих коливань напруги без впливу на відбір потужності полягає в управлінні потоком реактивної потужності. Це традиційно виконується, наприклад, за допомогою конденсаторних батарей або синхронних машин, що споживають або віддають реактивну потужність. Проте, оскільки сучасні вітрові турбіни підключаються до мережі через силові перетворювачі, поточна тенденція полягає у використанні гнучкості управління, що забезпечується силовою електронікою [4]. Регулювання реактивної потужності, коефіцієнта потужності або, безпосередньо, напруги може бути досягнуто шляхом адекватного управління електронними перетворювачами. Будь-яка з цих схем управління може бути реалізована незалежно від управління іншими частинами вітрогенераторів. Тобто, управління реактивною потужністю може бути відокремлене від управління кутом тангажу, швидкістю або крутним моментом. Управління реактивною потужністю не розглядається в цій роботі, оскільки воно більше пов'язане з електронним перетворенням енергії, ніж із перетворенням енергії вітру.

Вітрогенератори були класифіковані на чотири основні типи [8]:

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- Вітрогенератори з фіксованою швидкістю;
- Вітрогенератори зі змінним ковзанням;
- Вітрогенератори з подвійним живленням від асинхронного генератора (DFIG);
- Вітрогенератори з повним перетворенням.

Вітрогенератори з повним перетворенням Вітрогенератори з фіксованою швидкістю обертання є найпростішими вітрогенераторами, які діють у даний час. Вони працюють з малою зміною швидкості обертання ротора турбіни і використовують індукційні машини (ІМ) з короткозамкненим ротором, безпосередньо підключені до мережі. Деякі з цих турбін не мають можливості зміни кута нахилу лопатей.

Хоча ця технологія відносно міцна і надійна, у неї є істотні недоліки, які полягають у неоптимальному вловлюванні енергії вітру і необхідності компенсації реактивної потужності.

Вітрові турбіни зі змінною швидкістю розроблені для роботи в широкому діапазоні швидкостей обертання ротора. У таких вітрогенераторах зазвичай використовується регулювання кута нахилу лопатей. Керування швидкістю і потужністю дає змогу цим вітрогенераторам отримувати більше енергії з даного режиму вітру, ніж вітрогенератори з фіксованою швидкістю. Вітрогенератори зі змінним ковзанням або динамічним опором ротора керують опором у ланцюзі ротора машини, щоб забезпечити широкий діапазон зміни експлуатаційного ковзання (швидкості) (до 10 %). Однак потужність втрачається у вигляді тепла в опорі ротора.

Вітрогенератори з подвійним живленням асинхронного генератора (DFIG) вирішують цю проблему, використовуючи перетворювач змінного/постійного/змінного струму в ланцюзі ротора для відновлення потужності ковзання. Флюкс-векторне керування струмами ротора дає змогу розділити реальну та реактивну потужність, а також максимізувати вилучення енергії вітру та знизити механічні напруги[16].

У вітрогенераторах з повним конвертером перетворювач змінного/постійного/змінного струму "спина до спини" є єдиним шляхом потоку енергії від вітрової турбіни до мережі. Прямого підключення до мережі немає. Ці турбіни можуть використовувати синхронні або асинхронні генератори і пропонують незалежне управління реальною та реактивною потужністю.

1.4 Висновок до першого розділу

В розділі проведено огляд та аналіз конструкцій в області вітроелектростанцій. Описується загальна відомість в сфері вітроенергетики та проблеми в експлуатації промислових установок. Розглядається конструкція вертикального типу та її будова. Проводиться аналіз системи керування вітроелектростанціями.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 Розробка системи керування побутової вітроелектростанції

Вітрова енергетика є важливою складовою частиною глобальної стратегії з переходу до відновлювальних джерел енергії. Вітроелектростанції (ВЕС) є високоефективними пристроями для виробництва електричної енергії з використанням енергії вітру. Однак, для того, щоб ці станції працювали на максимальну потужність і при цьому не перевантажувалися або не зазнавали поломок, необхідно розробити ефективний алгоритм керування, який буде враховувати всі фактори, що впливають на роботу вітрової турбіни [7]. Алгоритм керування є серцем системи, яка визначає, як працюють усі елементи вітрової станції: від лопатей турбіни до генератора і системи передачі енергії.

2.1 Розробка алгоритму керування вітроелектростанцією

Вітрові турбіни працюють за принципом перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію, яка потім за допомогою генератора перетворюється на електричну енергію. Оскільки вітер є змінним за силою та напрямком, керування роботою турбін має бути максимально точним і адаптивним. Це означає, що алгоритм керування повинен бути здатний миттєво реагувати на зміни в умовах навколишнього середовища, щоб забезпечити максимальну ефективність виробництва енергії.

Основним завданням алгоритму керування є оптимізація роботи вітрової турбіни в залежності від швидкості і напрямку вітру. Кожен тип вітрової турбіни має свою оптимальну швидкість обертання лопатей, при якій досягається максимальна продуктивність. Якщо швидкість вітру занадто мала, турбіна не генерує достатньо енергії, а якщо вона занадто велика, існує ризик пошкодження обладнання. Алгоритм керування має враховувати ці фактори та забезпечувати роботу турбіни на оптимальних параметрах протягом усієї її роботи.

Для цього необхідно використовувати дані про швидкість і напрямок вітру, які надходять із сенсорів. Ці дані обробляються і використовуються для коригування кута нахилу лопатей турбіни, що дозволяє максимально використовувати енергію вітру. Наприклад, при слабкому вітрі лопаті турбіни можуть бути розташовані таким чином, щоб збільшити їх поверхню, що обертається, і забезпечити максимальний збір енергії. У разі сильного вітру, навпаки, лопаті повинні бути повернуті так, щоб зменшити їх поверхню та уникнути перевантаження турбіни.

Важливим аспектом розробки алгоритму є захист обладнання від надмірного навантаження, яке може призвести до його поломки. Вітрові турбіни можуть бути пошкоджені при надмірно сильному вітрі. Для уникнення цього алгоритм керування повинен забезпечувати своєчасне зменшення швидкості обертання лопатей або навіть повне їх зупинення при досягненні критичних значень швидкості вітру. Це може бути досягнуто за допомогою системи активного контролю, яка здатна швидко реагувати на зміни зовнішніх умов і забезпечити безпеку роботи станції.

Окрім цього, важливим елементом алгоритму є управління потужністю, що генерується вітровою турбіною. Оскільки вітер є змінним і непередбачуваним природним ресурсом, існує необхідність у підтримці стабільного виробництва електричної енергії. Для цього алгоритм повинен забезпечувати адаптивне регулювання потужності в залежності від швидкості вітру. Наприклад, при слабкому вітрі потрібно використовувати технології зберігання енергії (акумулятори або інші пристрої), щоб накопичувати надлишкову енергію та забезпечити безперебійне постачання електрики в мережу [10]. У разі сильного вітру може бути необхідним відводити надлишкову енергію до мережі або зменшувати виробництво електричної енергії шляхом зниження швидкості обертання турбін.

Невід'ємною частиною алгоритму керування є також система моніторингу та діагностики стану обладнання. Вона дозволяє своєчасно

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вітрових електростанцій, що сприятиме їх більш широкому впровадженню та використанню в глобальному енергетичному ландшафті.

Подальший розвиток алгоритмів керування вітроелектростанціями буде тісно пов'язаний із впровадженням новітніх технологій в області штучного інтелекту та машинного навчання. Ці технології можуть значно покращити процеси прогнозування та оптимізації роботи ВЕС, оскільки здатні обробляти величезні обсяги даних в реальному часі і забезпечувати більш точне управління. Наприклад, алгоритми машинного навчання можуть аналізувати величезну кількість даних про швидкість та напрямок вітру, температуру повітря, стан турбін та інші параметри, а також навчатися на основі історичних даних для передбачення змін вітрових умов. Це дозволить забезпечити більш точне налаштування турбін та інших елементів системи, що може призвести до зниження витрат на експлуатацію та підвищення ефективності генерації енергії.

Завдяки розвитку технологій Інтернету речей (IoT) у системах керування ВЕС, можливості для віддаленого моніторингу і управління турбінами значно розширюються. Сенсори, що встановлюються на різних елементах вітрових турбін, збирають дані про стан обладнання, швидкість обертання лопатей, температура і вологість повітря, вібрації та інші критичні параметри. Ці дані можуть бути передані на централізовану платформу, де вони обробляються і аналізуються з використанням алгоритмів штучного інтелекту. Це дає можливість не лише здійснювати оперативне управління вітроелектростанцією, а й здійснювати прогнозування та діагностику несправностей на ранніх етапах, що дозволяє знижувати витрати на обслуговування та ремонти [14].

Одним із перспективних напрямків є також використання алгоритмів для інтеграції вітрової енергії з іншими джерелами відновлювальної енергії, такими як сонячні панелі або біоенергетичні установки. Це дозволяє створювати гібридні системи, які забезпечують більш стабільне і безперебійне енергопостачання, оскільки різні джерела енергії мають різні профілі виробництва. Алгоритм керування в таких гібридних системах повинен бути

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

адаптивним і здатним динамічно управляти всіма джерелами енергії з урахуванням їх продуктивності та поточних вимог до споживання енергії в мережі.

Важливою частиною процесу розробки алгоритмів керування вітроелектростанцією є також інтеграція цих алгоритмів в систему «розумних мереж» (smart grid). Це дозволяє здійснювати двосторонній обмін інформацією між виробниками енергії (вітровими турбінами) та споживачами електричної енергії. Завдяки цій інтеграції можна оптимізувати не тільки виробництво енергії, але й її споживання, регулюючи навантаження в реальному часі, що підвищує ефективність роботи енергетичних систем і знижує витрати на їх експлуатацію. У такій системі алгоритм керування буде здатний координувати роботу різних джерел енергії, у тому числі і зберігання енергії в акумуляторах, для забезпечення оптимального балансування між попитом і пропозицією електричної енергії.

Перспективи розвитку алгоритмів керування ВЕС не обмежуються лише оптимізацією енергії та безпеки. Важливою задачею є зниження впливу вітрових турбін на навколишнє середовище, а також збільшення довговічності турбін. Розробка алгоритмів для зменшення шуму та вібрацій, моніторинг впливу турбін на птахів та інші елементи екосистеми, а також розробка методів для ефективного повторного використання матеріалів у разі потреби в заміні або модернізації обладнання — це лише деякі з нових напрямків, які можуть стати частиною сучасних алгоритмів керування.

Загалом, розробка алгоритмів керування для вітроелектростанцій є одним із ключових факторів, що визначають ефективність і довговічність таких установок. Враховуючи постійне зростання попиту на відновлювальні джерела енергії, покращення алгоритмів керування є важливою складовою частиною розвитку глобальної енергетики, сприяючи забезпеченню сталого і екологічно безпечного майбутнього [19]. З вдосконаленням технологій, що використовуються у вітрових електростанціях, і інтеграцією нових методів

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

обробки даних, таких як машинне навчання та штучний інтелект, ВЕС можуть стати важливою складовою частиною глобальної енергетичної системи, здатною забезпечити стабільне та ефективне виробництво електричної енергії.

Вдосконалення алгоритмів керування вітроелектростанціями також має велике значення для оптимізації використання вітрових ресурсів на глобальному рівні. У майбутньому ці алгоритми можуть стати важливою частиною інтегрованих систем, де вітрові турбіни зможуть «спілкуватися» одна з одною та з іншими енергетичними джерелами через платформу «розумних мереж». Це дозволить створити єдину інтегровану систему, в якій усі елементи, від вітрових турбін до великих енергетичних сховищ, працюють у синхронії, оптимізуючи виробництво та споживання енергії в реальному часі.

Такі мережі дозволяють за допомогою сучасних алгоритмів керування сприяти не лише більш ефективному використанню енергії, але й зменшенню витрат на її транспортування, зберігання та розподіл. Наприклад, коли одна частина енергетичної системи працює на пікових потужностях, інші її компоненти можуть знижувати навантаження, щоб уникнути перевантаження мережі. Це знижує ймовірність виникнення аварій, знижує втрати енергії та покращує загальну стабільність енергетичних систем [9].

Додатково важливим аспектом є інтеграція з великими обчислювальними потужностями, здатними обробляти значні обсяги даних. Завдяки застосуванню хмарних технологій та розподілених обчислень, вітрові електростанції можуть отримувати аналітику в режимі реального часу, що дозволяє не тільки оперативно реагувати на зміни у навколишньому середовищі, але й забезпечувати безперервне вдосконалення алгоритмів управління на основі аналізу великих даних. Прогнозування вітрових умов на основі штучного інтелекту стає все більш точним, що дозволяє вітровим станціям заздалегідь налаштувати свої турбіни для максимальної ефективності.

Інший важливий напрямок — це зменшення впливу на навколишнє середовище, пов'язане з виробництвом енергії. Алгоритми керування мають

важливу роль у зниженні шумового та вібраційного впливу на екосистеми. Сучасні системи керування можуть автоматично регулювати роботу турбін таким чином, щоб мінімізувати викиди шуму та вплив на тварин, зокрема птахів. Врахування екологічних аспектів у розробці алгоритмів дозволяє поєднати ефективно виробництво енергії з мінімізацією негативного впливу на природні екосистеми.

Враховуючи всі ці фактори, можна сказати, що розвиток алгоритмів керування для вітроелектростанцій має величезний потенціал для підвищення ефективності використання вітрових ресурсів і зменшення витрат на енергетичні інфраструктури в майбутньому. Вітрові турбіни будуть відігравати все більшу роль у забезпеченні чистої та відновлювальної енергії, а вдосконалені алгоритми керування дозволять максимально використовувати потенціал цих джерел.

Зокрема, у контексті розвитку технологій енергетичних мереж нового покоління, таких як «розумні» мережі, роль алгоритмів керування вітровими електростанціями стане ще важливішою. Вони повинні будуть інтегруватися з іншими джерелами відновлювальної енергії, створюючи цілісну систему, що гарантує стабільність та надійність енергетичних постачань. Оскільки світова спільнота активно прагне до енергетичної незалежності та зменшення викидів парникових газів, розвиток алгоритмів керування вітроелектростанціями буде мати критичне значення для майбутнього енергетичної інфраструктури.

Таким чином, вітрові електростанції, підкріплені передовими алгоритмами керування, здатні стати не тільки основою для забезпечення чистої енергії, але й важливим елементом глобальної стратегії сталого розвитку. Врахування усіх аспектів роботи таких систем — від ефективності генерації енергії до безпеки і екологічності — дозволить створити надійні та ефективні енергетичні системи, здатні задовольнити зростаючий попит на чисту енергію в умовах мінливих кліматичних умов і технологічних інновацій [21].

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

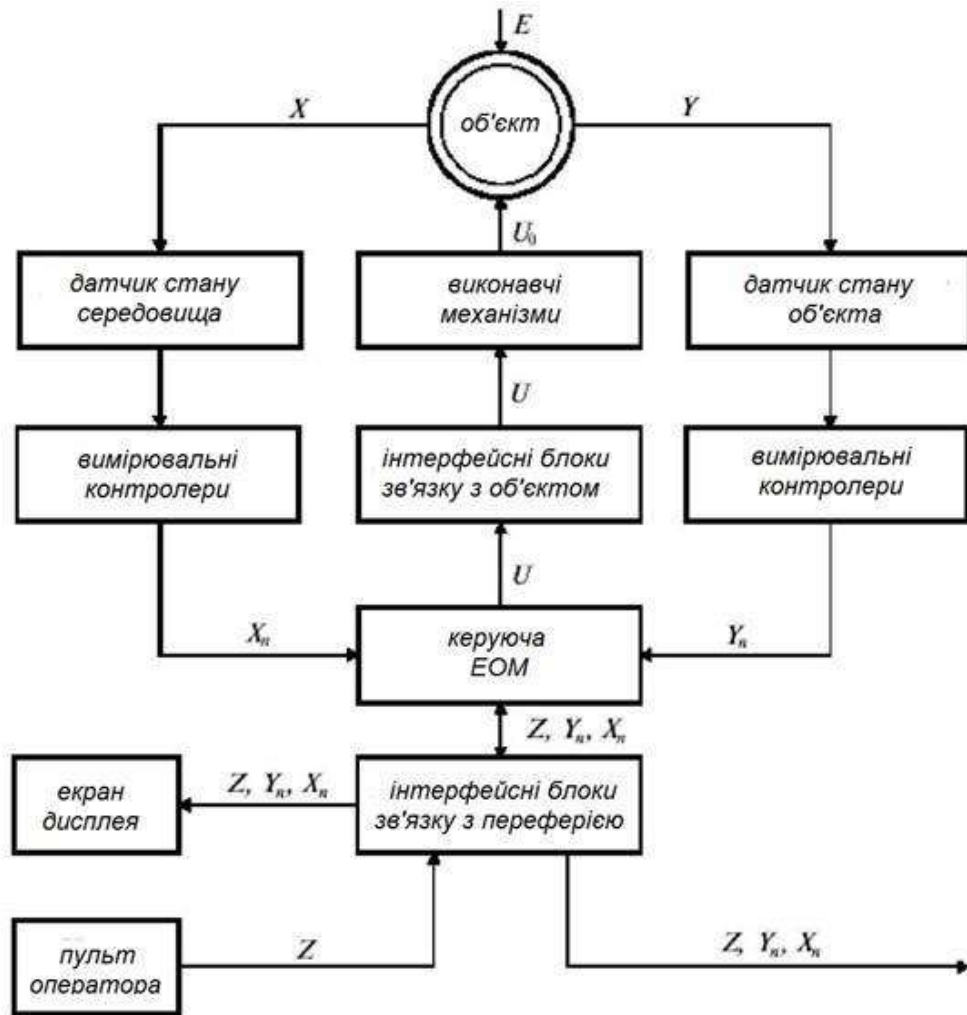


Рисунок 2.1 – Алгоритм роботи вітрогенератора

Алгоритм роботи вітрогенератора полягає в ефективному використанні енергії вітру для вироблення електричної енергії. Сучасні вітрогенератори оснащені системами керування, що дозволяють адаптувати їхню роботу до змінних погодних умов.

Основним елементом алгоритму є регулювання кута нахилу лопатей та швидкості обертів ротора залежно від сили вітру. Важливою частиною є контроль над потужністю генератора: при сильному вітрі система може знижувати обороти або застосовувати обмеження, щоб уникнути пошкоджень. Також алгоритм забезпечує стабільну передачу енергії в електричну мережу, синхронізуючи вихідну напругу та частоту з параметрами мережі.

Окрім цього, алгоритм постійно моніторить стан вітрогенератора, здійснюючи діагностику систем та надаючи сигнали про необхідність технічного обслуговування. Для підвищення ефективності роботи також використовуються прогностичні моделі, що дозволяють на основі прогнозів вітрових умов оптимізувати режим роботи установки.

2.2 Розробка блок схеми моделювання системи вітроелектростанції

Схеми для виконання моделювання системи вітрогенератора в Simulink показано на рисунку 2.1.

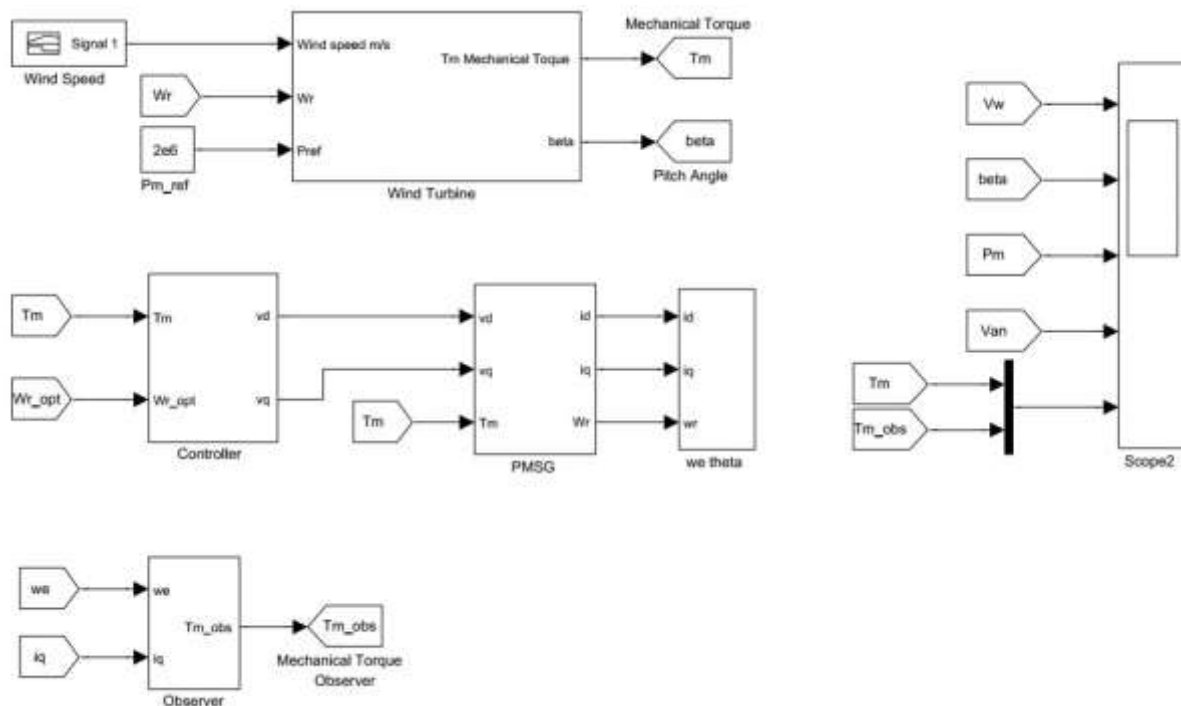


Рисунок 2.1 - Блок-схема система вітрогенератора в Simulink

Параметри вітротурбіни [8]:

- Радіус ротора: $R=38\text{м}$
- Густина повітря: $=1,205\text{ кг/м}^3$
- Максимальний коефіцієнт потужності: $C_{P_{\max}} = 0.4421$
- Номінальна вітряна швидкість: $v_{wrate} = 11.8\text{ м/с}$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

- Постійний коефіцієнт максимальної потужності: $K_{p\ opt-} = 0.201$
 мВт/(рад/с)³

Параметри цього генератора [8]:

- Потужність: $P_{Gen\ rated} = 2$ МВт
- напруги: $V_{Gen\ rated} = 4$ КВ
- Номінальна частота обертання ротора: $E_{r\ rated} = 2,18$ рад/с
- Номер активної пари: $P = 11$
- Потік: $\Phi = 136$ Вб
- Індуктивність статора по осі d: $L_d = 0,334$ н - Індуктивність статора по осі q: $L_q = 0,217$ н
- Опір статора: $R_s = 0,08$
- Коефіцієнт тертя: $B = 0,01$

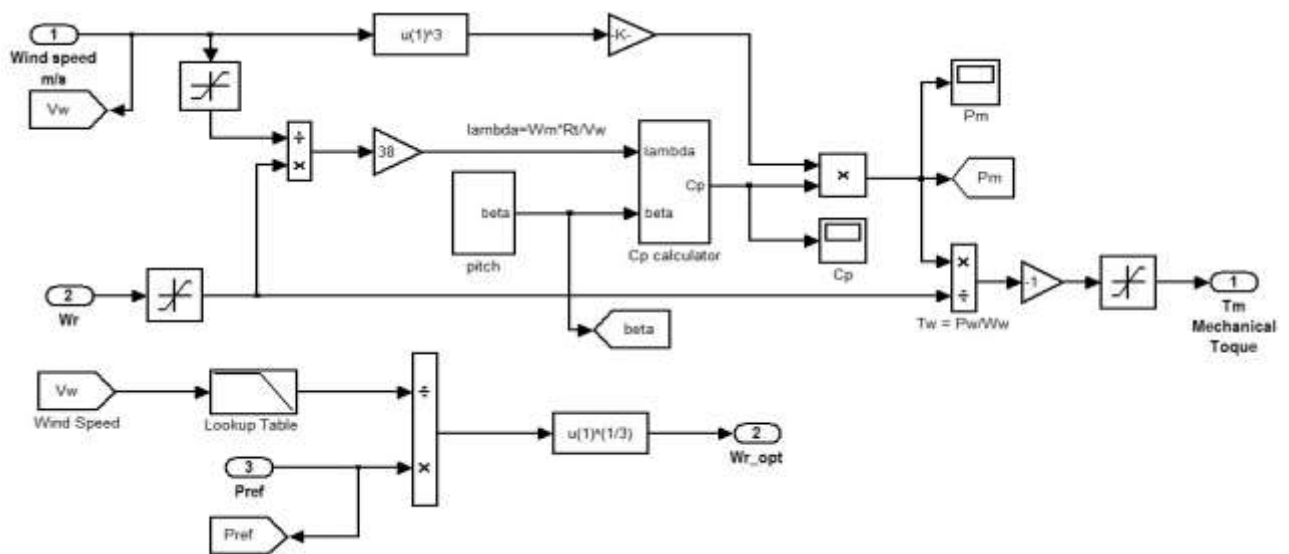


Рисунок 2.2 - Блок-схема вітряних турбін

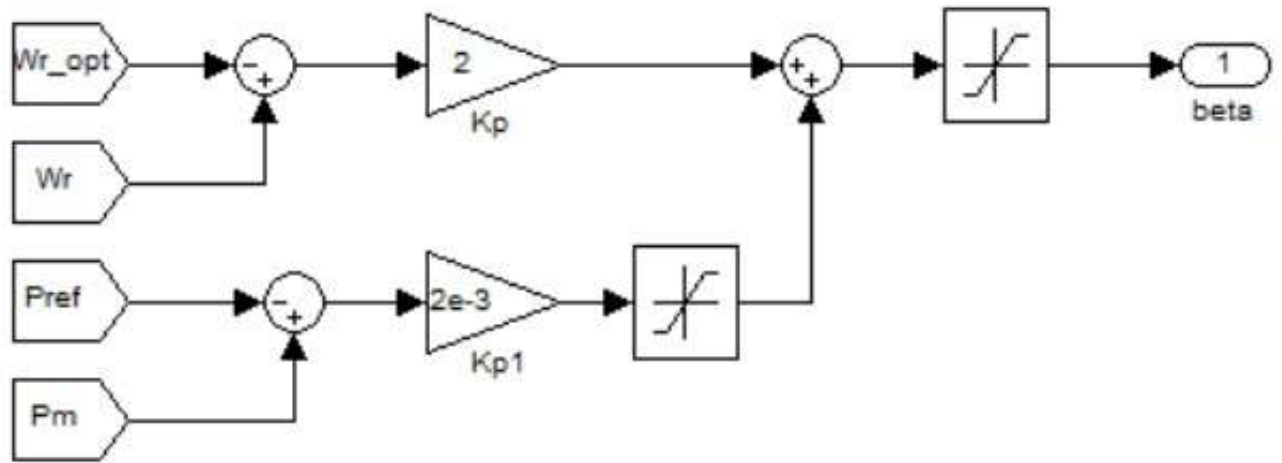


Рисунок 2.3 - Блок-схема системи керування кутом атаки

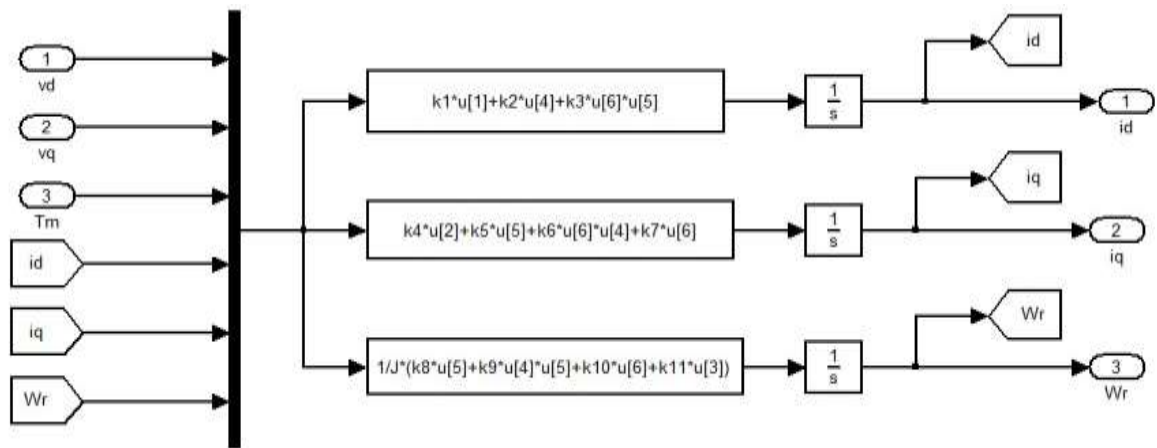


Рисунок 2.4 - Блок-схема синхронного генератора з постійними магнітами

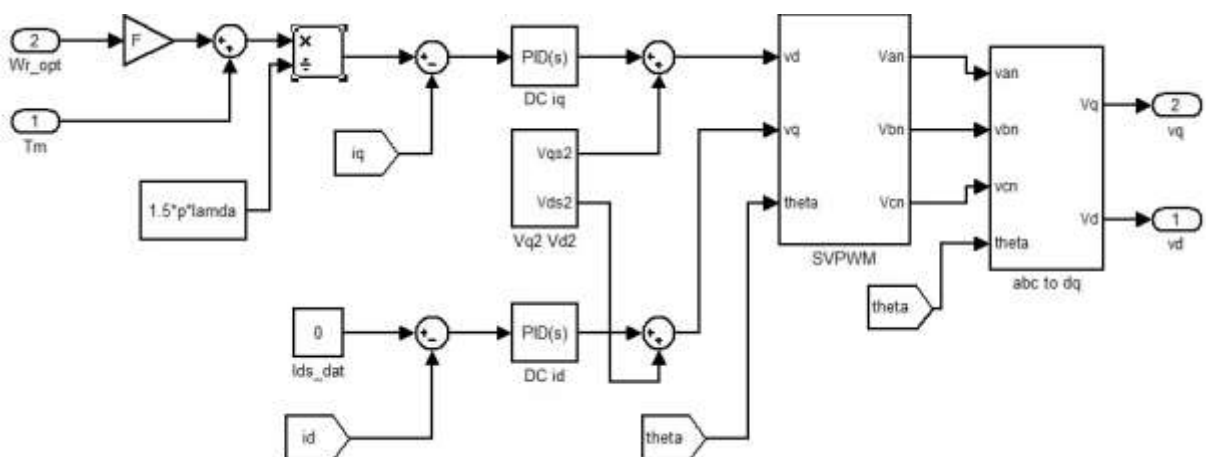


Рисунок 2.5 - Блок-схема система керування генератора

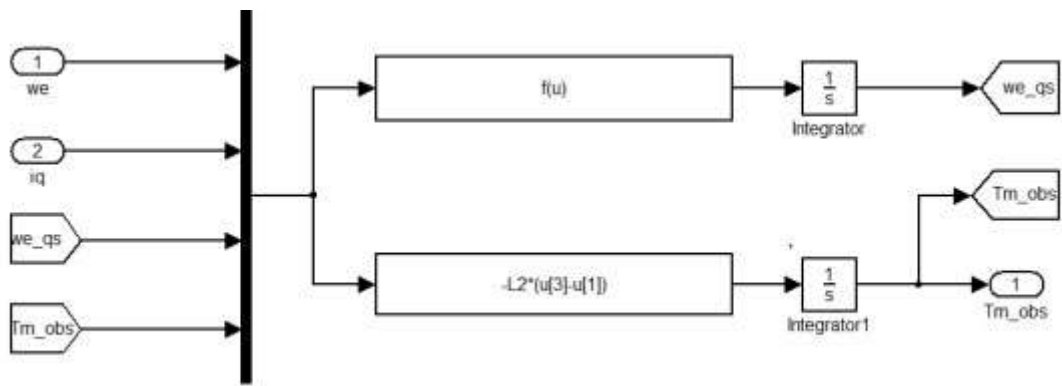


Рисунок 2.6 - Блок-схема спостерігача крутного моменту

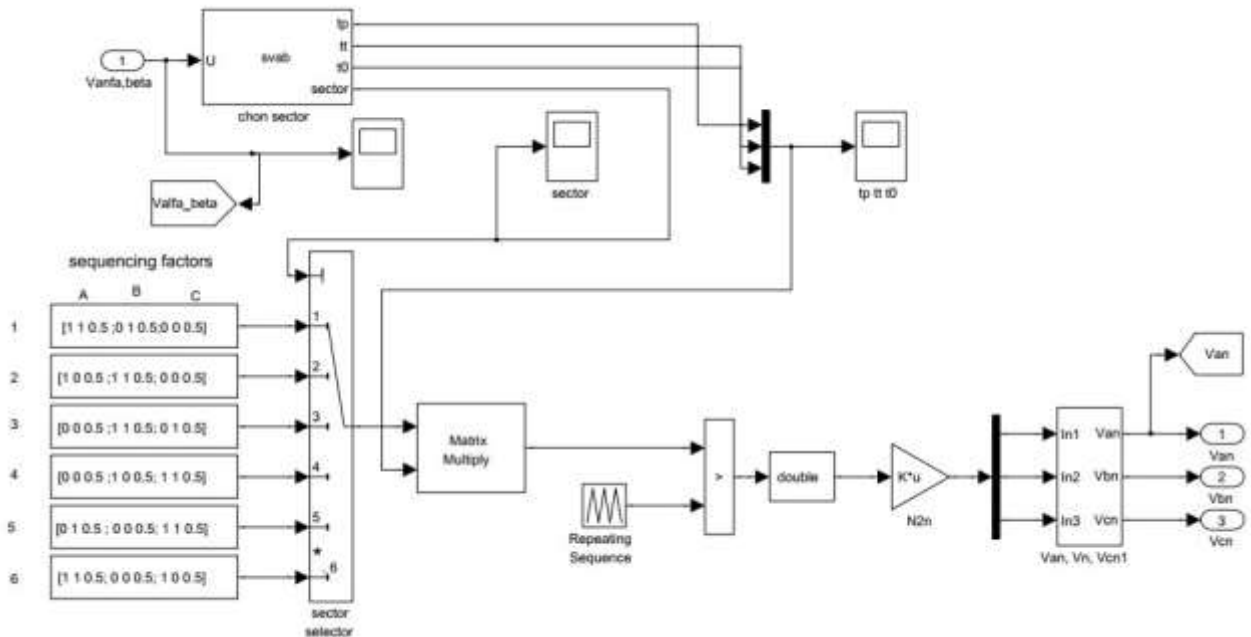


Рисунок 2.7 - Блок-схема SVPWM

2.3 Висновок до другого розділу

У цьому розділі представлено алгоритм розробленої системи керування вітрогенератором у Simulink. На основі аналізувань результатів показано залежність потужності від швидкості вітру та кута атаки. Ця система працює стабільно в області, що перевищує номінальну швидкість вітру.

3 Класифікація, стратегії та моделювання систем керування

3.1 Класифікація системи керування вітрогенераторів

Вітрогенератори були класифіковані на чотири основні типи [8]:

- Вітрогенератори з фіксованою швидкістю (рисунок 3.1).
- Вітрогенератори зі змінним ковзанням (рисунок 3.2).
- Вітрогенератори з подвійним живленням від асинхронного генератора (DFIG) (рисунок 3.3).
- Вітрогенератори з повним перетворенням (рисунок 3.4).

Блок – схема цих типів вітрогенераторів представлена наступних рисунках:

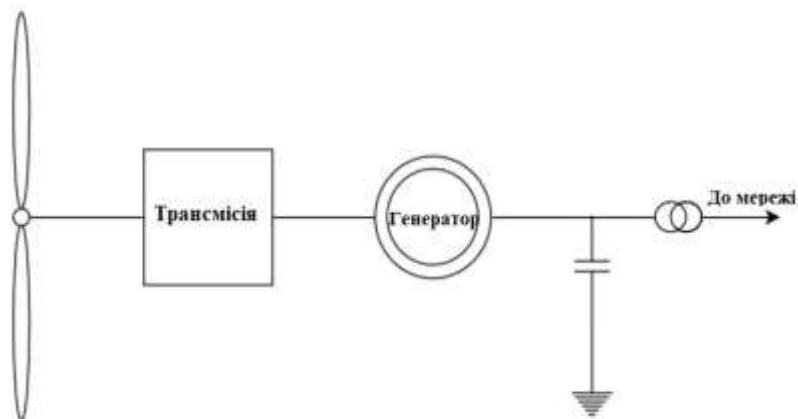


Рисунок 3.1 – Вітрогенератори з фіксованою швидкістю

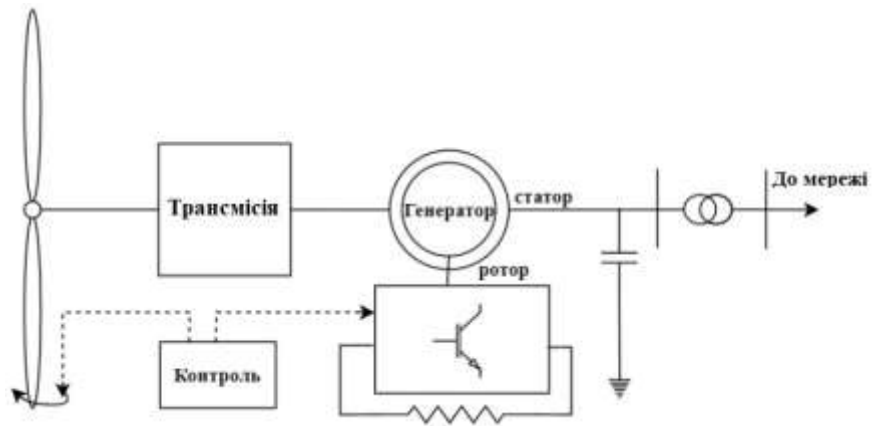


Рисунок 3.2 – Вітрогенератори зі змінним ковзанням

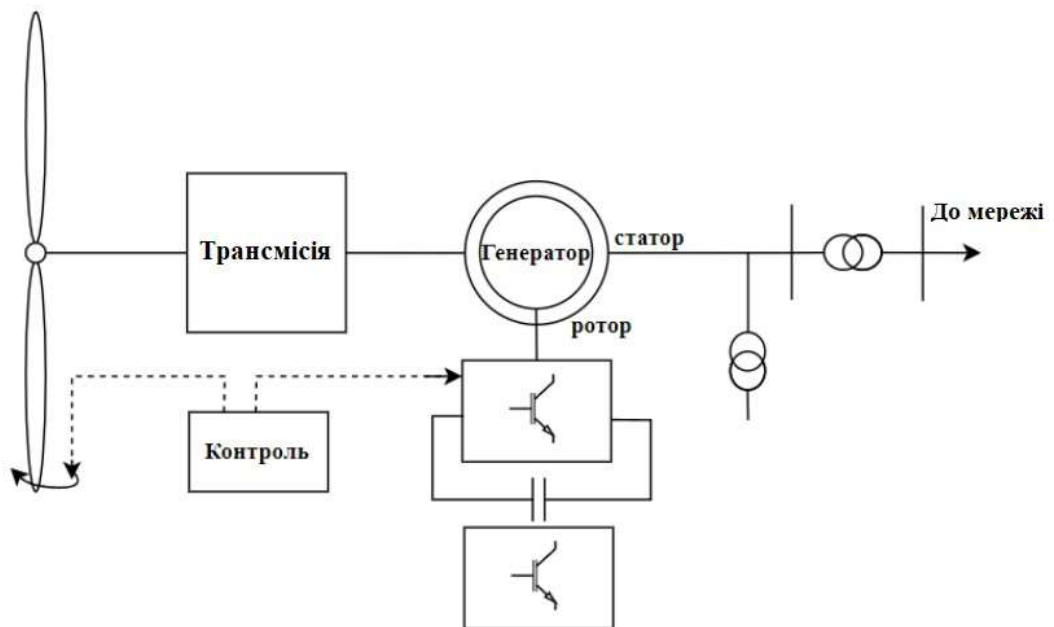


Рисунок 3.3 – Вітрогенератори з подвійним живленням від асинхронного генератора (DFIG)

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

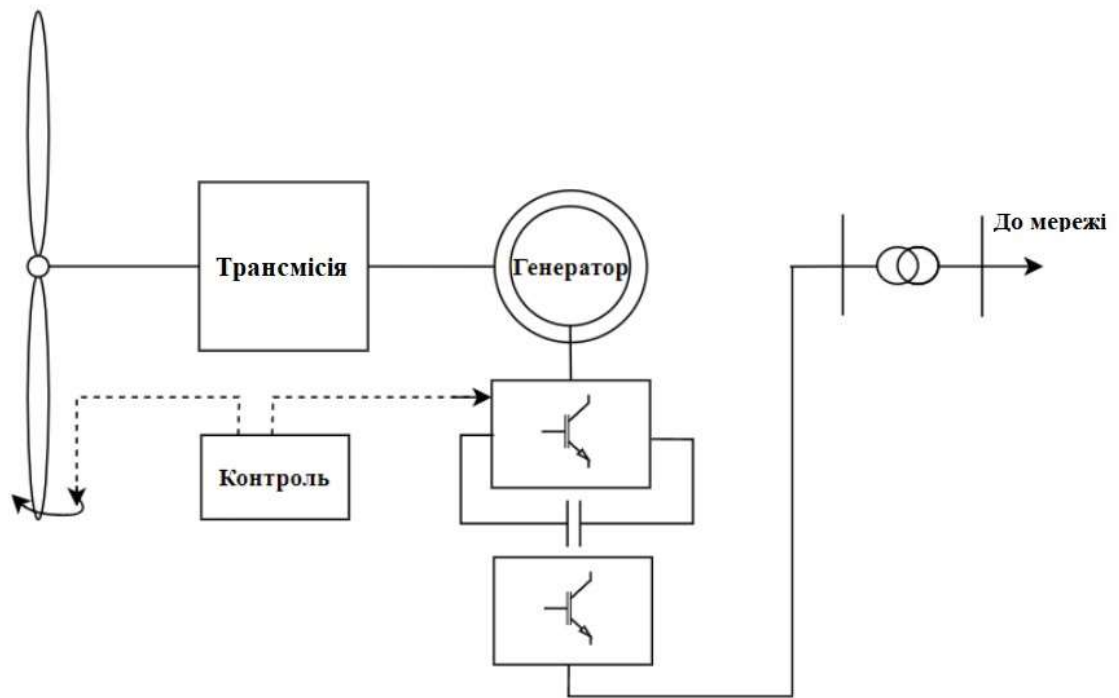


Рисунок 3.4 – Вітрогенератори з повним перетворенням

Вітрогенератори з фіксованою швидкістю обертання є найпростішими вітрогенераторами, які зараз діють. Вони працюють з малою зміною швидкості обертання ротора турбіни та використовують індукційні машини (ІМ) з короткозамкненим ротором, безпосередньо підключені до мережі. Деякі з цих турбін не мають можливості зміни кута нахилу лопатей.

Хоча ця технологія відносно міцна і надійна, вона має суттєві недоліки, що полягають у неоптимальному вловлюванні енергії вітру та необхідності компенсації реактивної потужності.

Вітрові турбіни зі змінною швидкістю розроблені для роботи в широкому діапазоні швидкостей обертання ротора. У таких вітрогенераторах зазвичай використовують регулювання кута нахилу лопатей. Керування швидкістю та потужністю дозволяє цим вітрогенераторам видобувати більше енергії з даного режиму вітру, ніж вітрогенератори з фіксованою швидкістю. Вітрогенератори зі змінним ковзанням або динамічним опором ротора керують опором у ланцюзі ротора машини, щоб забезпечити широкий діапазон зміни експлуатаційного

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

ковзання (швидкості) (до 10%). Однак потужність губиться у вигляді тепла в опорі ротора. Вітрогенератори з подвійним живленням асинхронного генератора [16].

(DFIG) вирішують цю проблему, використовуючи перетворювач змінного в постійного і в змінний струм кола ротора для відновлення потужності ковзання. Флюкс-векторне керування струмами ротора дозволяє розділити реальну та реактивну потужність, а також максимізувати вилучення енергії вітру та знизити механічну напругу.

У вітрогенераторах з повним перетворенням з постійного струму у змінний струм "спина до спини" є єдиним шляхом потоку енергії від вітрової турбіни до мережі. Прямого підключення до мережі немає. Ці турбіни можуть використовувати синхронні або асинхронні генератори та пропонують незалежне керування реальною та реактивною потужністю.

3.2 Стратегії керування вітрогенератором

Стратегія керування в певному випадку характеризується тим, як турбіна проектується для наближення в стані стабілізації до кривої максимальної потужності в діапазоні потужність - швидкість вітру.

Таким чином, стратегія керування встановлює значення крутного моменту (або потужності) і швидкості обертання ротора для кожної швидкості вітру в діапазоні роботи турбіни. Стратегія керування впливає на налаштування та конструкцію контролера. Насправді, схеми керування можуть відрізнятися залежно від регіону експлуатації. Більше того, моделі малих сигналів, які використовуються для проектування регулятора, сильно залежать від режимів та регіонів роботи.

Можливо, найбільш підходящим простором зображення стратегії керування є простір "крутний момент - швидкість обертання - швидкість вітру". Але для допомоги в поясненні криві часто проектується на площину моменту,

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

що крутить, - швидкості обертання. Стратегію керування представлено робочим місцем турбіни, параметризованим швидкістю вітру. У цій роботі представлені та розглянуті різні стратегії керування [24].

Схема роботи з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки була домінуючою протягом кількох десятиліть. Проте останнім часом кількість комерційних вітрових турбін, що ґрунтуються на цій схемі, зменшується.

В цій схемі асинхронна електрична машина безпосередньо підключена до електромережі. Тому її характеристика моменту, що крутить, не може бути змінена. Отже, швидкість генератора фіксується в залежності від частоти електромережі. Таким чином, кажуть, що вітрогенератор працює із фіксованою швидкістю. Насправді швидкість змінюється кілька відсотків уздовж характеристики крутного моменту генератора через ковзання.

Через відсутність додаткових апаратних засобів для реалізації стратегії керування, вітрогенератор з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки дуже прості та недорогі. Як наслідок, їх експлуатаційні показники досить низькі. На практиці, для зниження механічних навантажень та поліпшення якості електроенергії не може бути вжито жодних активних дій з керування. Крім того, ефективність перетворення ще не стала оптимальною.

На рисунок 3.5 показано обрану стратегію керування вітрогенераторами з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки у площині крутний момент - швидкість обертання.

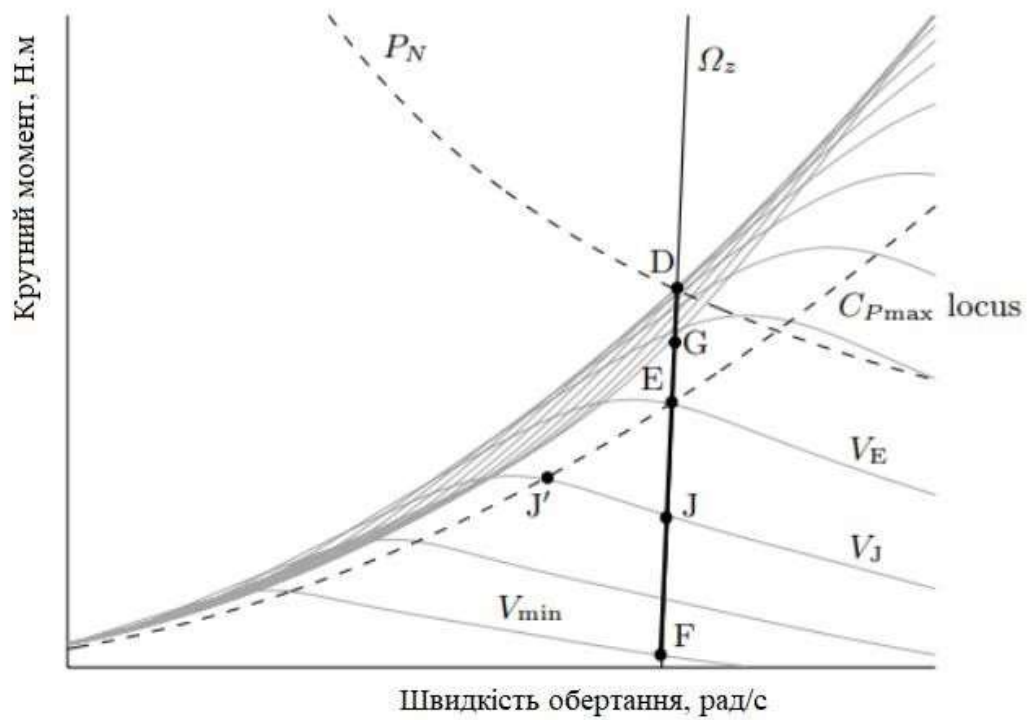


Рисунок 3.5 – Основна стратегія керування вітрогенератора з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки

Суцільна лінія зображує характеристику реактивного моменту, а сірі лінії зображують характеристики аеродинамічного моменту різних швидкостей вітру від V_{min} до V_{max} . Варто нагадати, що точки перетину є точками режиму роботи вітрогенератора, що встановився, при відповідних швидкостях вітру.

Через те, що момент реакції та аеродинамічний момент не можуть бути змінені, тому всі можливі робочі точки обмежені відрізком FD. Швидкість обертання майже постійна вздовж FD, тому потужність більш менш пропорційна крутному моменту протягом усього цього робочого відрізка. Робоча точка F відповідає швидкості вітру V_{min} , а D є точкою, де характеристика моменту опору перетинає фронт зриву, тобто. верхню межу всіх параметрів аеродинамічного моменту.

Ця точка визначає максимальну потужність, яку може одержати турбіна. При швидкості вітру V_D , Для якої характеристика аеродинамічного моменту

проходить через точку D, турбіна зупиняється. Тому вища швидкість вітру призводить до зниження аеродинамічної потужності. Тому робоча точка переміщається назад за характеристикою моменту, що крутить, генератора до досягнення точки G, пов'язаної зі швидкістю вітру відсічки V_{\max} . Слід зазначити, що є суперпозиція робочих точок на відрізку GD. Це означає, що швидкість вітру не може бути однозначно визначена робочою точкою [17].

На рисунку 3.5 зображена парабола, що показує точку максимальної ефективності перетворення, також звана точкою максимальної потужності або S_{max} . Вона показує, що турбіна працює з максимальною ефективністю за певної швидкості вітру V_E . Ця ситуація відповідає точці E, де точка максимуму потужності, момент реакції та аеродинамічний момент для $V=V_E$ перетинаються.

R^E у цій точці швидкість вітру та швидкість обертання задовольняють V_E .

Допустимо тепер, що вітрогенератор працює при E, коли швидкість вітру падає з

V_E до V_J . Тоді новою робочою точкою буде J. У цей момент співвідношення R^E більше, чим 0, тому ефективність швидкості обертання наконечника V_J

перетворення зменшується. Щоб отримати всю потужність, доступну при V_J , турбіна повинна працювати в точці J' де швидкість обертання R^{V_E} менше.

Це нездійсненно при стратегії керування з фіксованою швидкістю.

Вітрогенератор з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки управляються при високих швидкостях вітру. Тобто, обмеження потужності нижче за номінальну потужність відбувається в режимі пасивного зупинки. Тому вибір стратегії керування зводиться до вибору передатного відношення редуктора для проходження характеристики генератора через точку D. Зверніть увагу, що ця точка є точкою перетину гіперболи номінальної потужності (яка є межею регіону безпечної експлуатації) та передньої фронтальної лінії зриву.

Таким чином, номінальна потужність перевищена за відсутності швидкості вітру.

На рисунку 3.6 показаний метод пасивного зриву обмеження потужності.

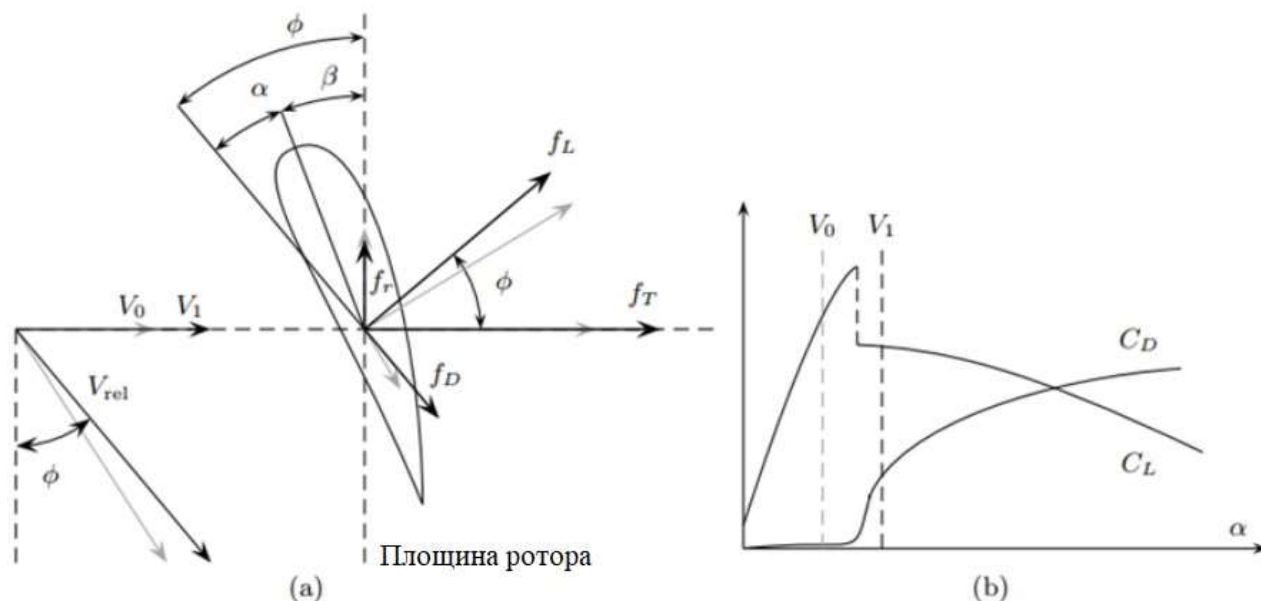


Рисунок 3.6 – Стратегія пасивного зриву для обмеження потужності: (a) сили, що діють на елемент лопасті; (b) коефіцієнти опору та підйомної сили

На рисунку якісно показані сили, що діють елемент лопаті до (сірий колір) і після (чорний колір) зриву. Нагадаємо, що швидкість обертання та кут атаки фіксовані. Тоді кут нахилу збільшується при збільшенні швидкості вітру, що випробовується елементом лопаті, від V_0 до V_1 . Коли перевищує задане значення, повітряний потік перестає бути ламінарним і відокремлюється від верхньої сторони аеродинамічної спіралі. Це спричиняє перепад тиску, який зменшує підйомну силу та різко збільшує опір. Зміна підйомної сили f_L та сили опору f_D призводить до значного збільшення осьової сили тяги f_T , в той час як тангенційна сила f_t зменшується незначно. В результаті аеродинамічний момент та потужність зменшуються. Вважається, що турбіна зривається. Небажаним наслідком регулювання зриву є збільшення тяги, що призводить до збільшення аеродинамічного навантаження.

На рисунку 3.7 показані характеристики фіксування потужності базової стратегії керування з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки, показаної на рисунку 3.5.

В верхній частині рисунка порівнюються криві фактичної та максимальної потужності, а в нижній частині показано ефективність перетворення залежно від швидкості вітру. На рисунку зазначені точки, відповідні точкам рисунку 3.5.

Видно, що отримана потужність відповідає кривій максимальної потужності. Це означає нижчий рівень одержання енергії. У регіоні низької швидкості вітру турбіна працює з максимальною ефективністю лише у одній точці (точка E). При швидкості вітру вище за номінальну регулювання потужності не дуже хороше. Видно, що номінальна потужність досягається тільки за однієї швидкості вітру (точка D), а за меншої та більшої швидкості вітру потужність зменшується. Таке погане регулювання пояснюється недостатньою гнучкістю режиму роботи.

Крім низької ефективності перетворення, робота з фіксованою швидкістю характеризується іншими недоліками, пов'язаними з динамічною поведінкою вітрогенератор. Наприклад, погана властивість регулювання призводить до коливань активної та реактивної потужності на лініях електропередачі. Крім того, цей режим роботи не забезпечує керуючих впливів для введення демпфування в трансмісію, що послабило високочастотні навантаження і викиди флікера. На практиці зниження популярності вітрогенераторів з фіксованою швидкістю і фіксованим кутом атаки в основному пов'язане з поганою якістю електроенергії, а не зі зниженням уловлювання енергії.

межі швидкості обертання. У цьому випадку робочий локус зводиться до кривої АС.

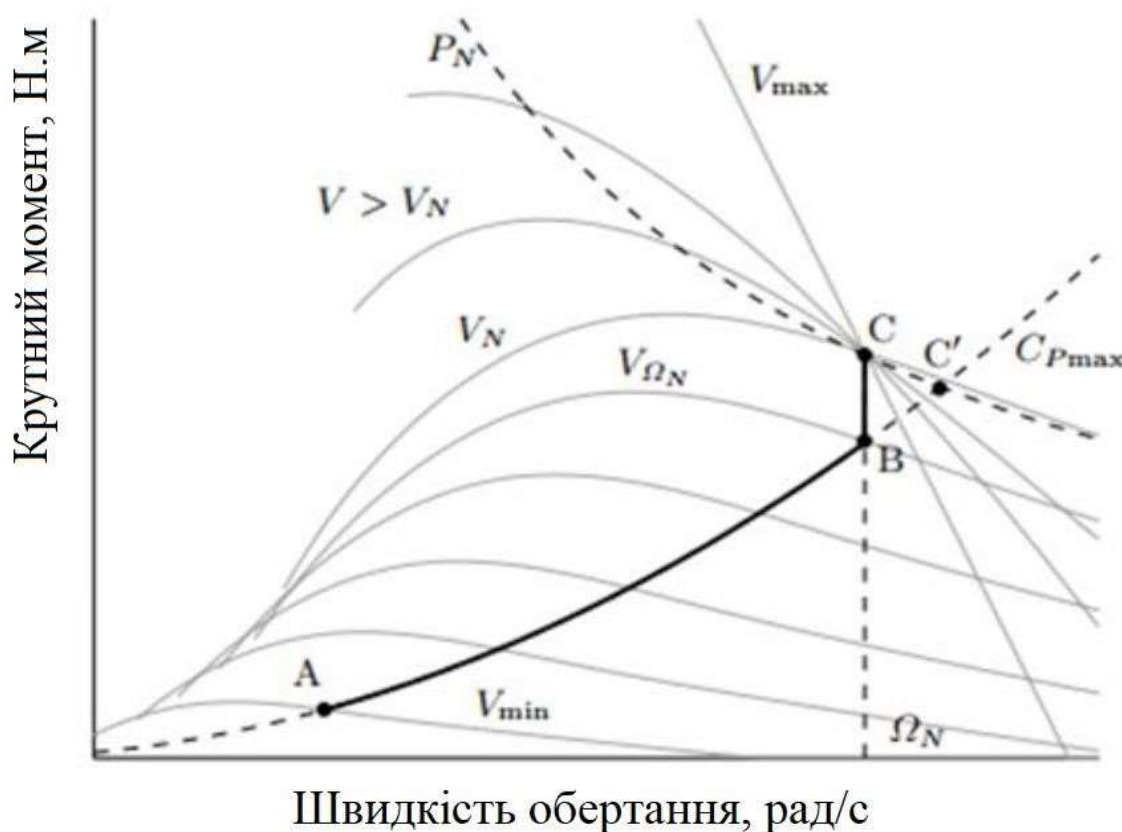


Рисунок 3.8 – Базова стратегія керування зі змінною швидкістю та змінним кутом атаки (pitch-to-feather)

Робота зі змінною швидкістю збільшує можливість отримання енергії при низькій швидкості вітру, тоді як робота зі змінним кутом атаки дозволяє ефективно регулювати потужність при швидкості вітру, що перевищує номінальну. Крім того, робота зі змінним кроком полегшує перехідні навантаження. Це важлива перевага даної стратегії керування порівняно зі змінною швидкістю та фіксованим кутом атаки, особливо для великомасштабних вітрових турбін. Більш того, одночасне керування кутом атаки та швидкістю вище номінальної швидкості вітру забезпечує важливі переваги для динамічних характеристик вітрогенератора в умовах сильного вітру.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

3.3 Моделювання системи вітрогенератора

В цьому розділі представлено моделювання системи вітрогенератора. Для цього підсистеми моделюються, а потім об'єднуються моделі у велику модель системи. На наступному рисунку 3.9 представлена блок - схема моделювання системи вітрогенератора.

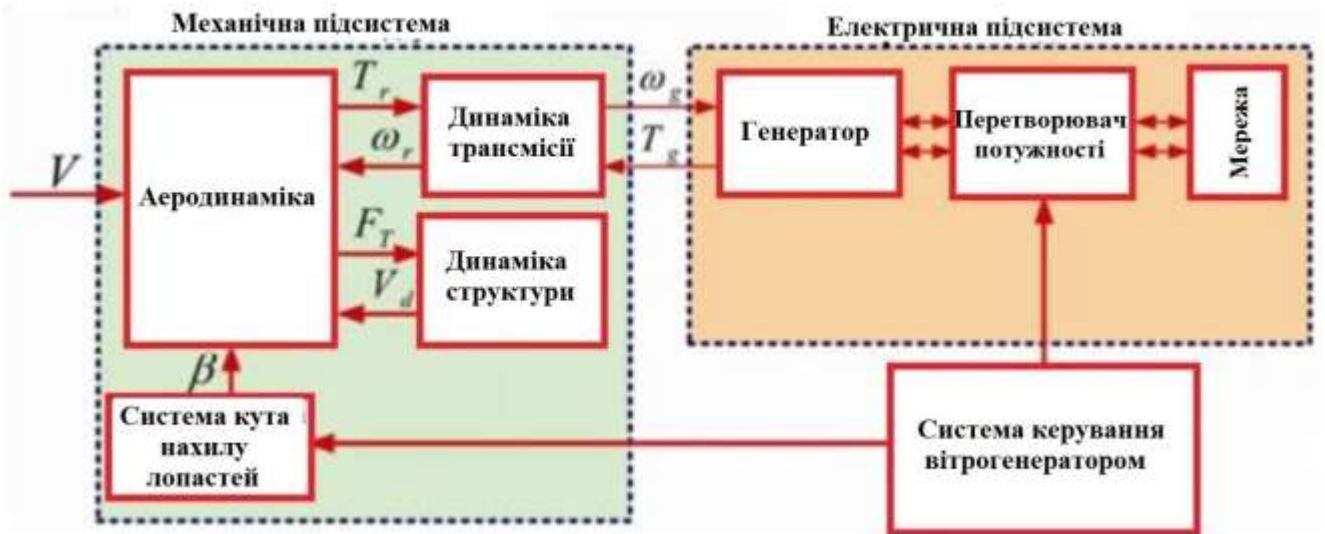


Рисунок 3.9 – Блок - схема моделювання системи вітрогенератора

Моделювання аеродинамічної вітротурбіни

Кінетична енергія E (Дж) повітряної маси m (кг), що рухається зі швидкістю V (м/с), визначається за наступним рівнянням:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.1)$$

Рекуперації потужності визначаються за такою формулою [18]:

$$P_m = 0.5 \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda_r, \beta) \quad (3.2)$$

Рівняння (2.2) у системі відносних одиниць:

$$P_{m_pu} = k_p C_{p_pu} V_{wind_pu}^3 \quad (3.3)$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Загальне рівняння коефіцієнта потужності $C_p(V_{wind_pu})$ цього рівняння залежить від параметрів конкретної турбіни.

На рисунку 2.10 представлено коефіцієнт C_p , який залежить від V_t для кожного P , коефіцієнти з c_1 від c_6 : $c_1= 0.5176$, $c_2= 116$, $c_3= 0.4$, $c_4= 5$, $c_5=21$; $c_6=0.0068$ [21].

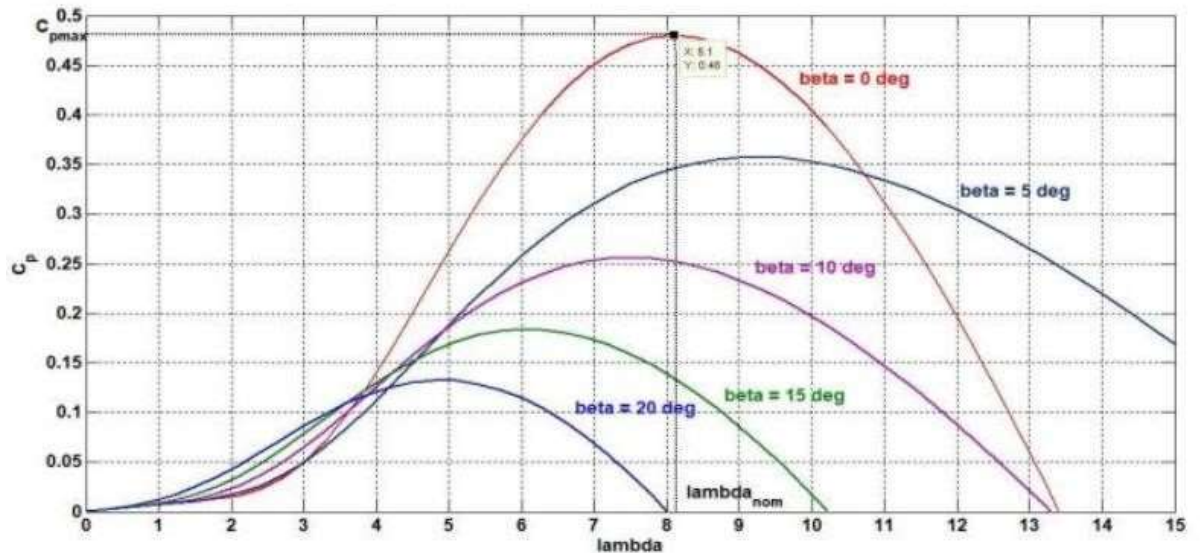


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт потужності C_p залежить від V

Максимальне значення C_p дорівнює 0.48 при $V = 0$, $R_t = 8.1$, це значення V_t називаються номінальна вартість (nominal value) $V_{t\ nom}$.

Відстеження точки максимальної потужності

Алгоритм відстеження точки максимальної потужності необхідний вітрогенератора, щоб отримати максимальну можливу потужність від вітру, яка динамічно залежить від швидкості вітру. Залежно від швидкості вітру існує певна швидкість генератора, який має максимальну потужність. При перевищенні певної швидкості генератора, отримана потужність буде різко знижена [11]. Таким чином, МРРТ контролер використовується для відстеження питомої швидкості та отримання максимальної потужності з вітру в змінній швидкості вітряної турбіни.

Потужність турбіни виходить від швидкості вітру за співвідношенням:

$$P_m = 0.5 \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda_t, \beta)$$

На рисунку 3.11 показана залежність між механічною потужністю та швидкістю обертання турбіни для різних швидкостей вітру:

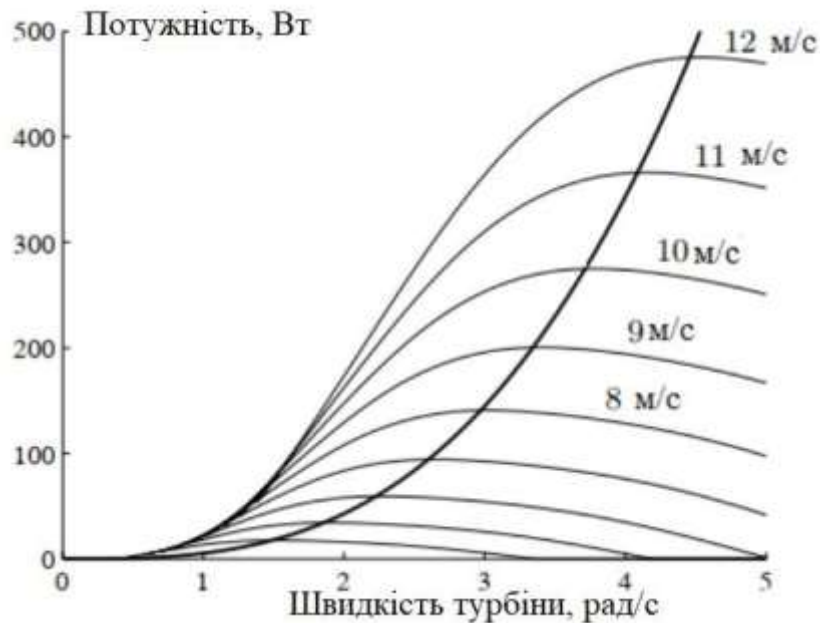


Рисунок 3.11 – Залежність потужності від швидкості турбіни

Горизонтально-осьова вітрова турбіна є складною механічною системою, що складається з взаємодіючих пристроїв з певним ступенем гнучкості. Як і будь-яка гнучка конструкція, вітрова турбіна має багато режимів коливань. Тому необхідно ретельне проектування вітрової турбіни та контролера. В механічній моделі акцент робиться тільки на ті частини динамічної структури вітрової турбіни, які роблять внесок у взаємодію з мережею [9]. Тому в першу чергу розглядається тільки приводна передача, так як ця частина вітрової турбіни має найбільший вплив на коливання потужності. На рисунку 3.12 показано механічну модель приводної передачі

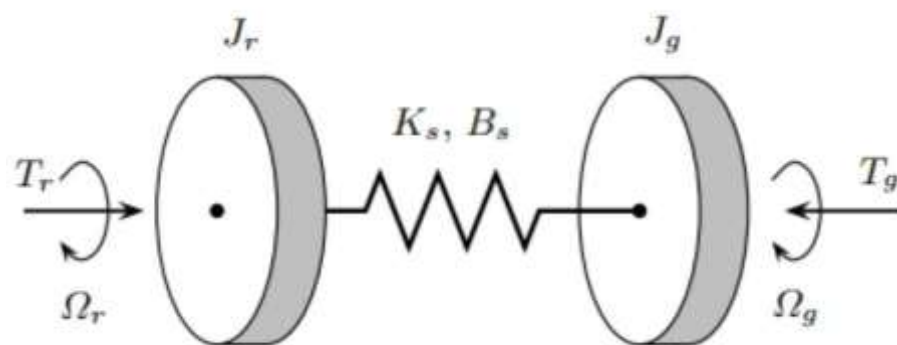


Рисунок 3.12 – Механічна модель приводної передачі

У здебільшого, це модель двох мас, з'єднаних гнучким низькошвидкісним валом, що характеризується жорсткістю K_s і демпфуванням B_s . Дві маси відповідають великій інерції J_r ротора турбіни, що представляє лопаті і ступецю, малої інерції J_g , представляє індукційний генератор.

3.4 Математична модель синхронного генератора з постійними магнітами

В синхронному генераторі з постійними магнітами завжди існує фіксований магнітний потік завдяки системі постійних магнітів, які рівномірно встановлені на поверхні ротора, тому потік ротора завжди має чітку поляризацію та орієнтацію. Тому була досліджена модель генератора в системі координат обертання dq із напрямком справжньої осі d збігаються з віссю потоку. Система координат обертається навколо початку координат з кутовою швидкістю ω , яка є механічною швидкістю ротора і також збігається з кутовою швидкістю ω_s .

В трифазних машинах змінного струму у всіх нас є три синусоїдальні струми з однаковою амплітудою, частотою та різницею фаз, поточні статор через три полюси, відповідні фазам u , v , w .

Ці три струми i_{su} , i_{sv} , i_{sw} задовольняють рівняння

$$i_{su}(t) + i_{sv}(t) + i_{sw}(t) = 0 \quad (3.6)$$

На механічній площині (поперечному перерізі) машини встановлюємо комплексну систему координат з дійсною віссю, що проходить через обмотку уфази. У цій системі координат визначено просторовий вектор струму статора наступним чином:

$$i_s = \frac{2}{3} [i_{su}(t) + i_{sv}(t)e^{j120^\circ} + i_{sw}(t)e^{j240^\circ}] = |i_s| e^{j\omega_s t} \quad (3.7)$$

Струм кожної фази є проекцією відповідного вектора статора струму на вісь відповідної фазної обмотки. Для інших величин статора машини, таких як статора напруга, потік статора, можемо побудувати відповідні просторові вектори, як для струмів статора, згаданих вище. Загалом будь-яка статорна величина x визначає просторовий вектор наступним чином:

$$x_s \frac{2}{3} [x_{su} + x_{sv}(t)e^{j120^\circ} + x_{sw}e^{j240^\circ}] = |x_s| e^{j\omega_s t} \quad (3.8)$$

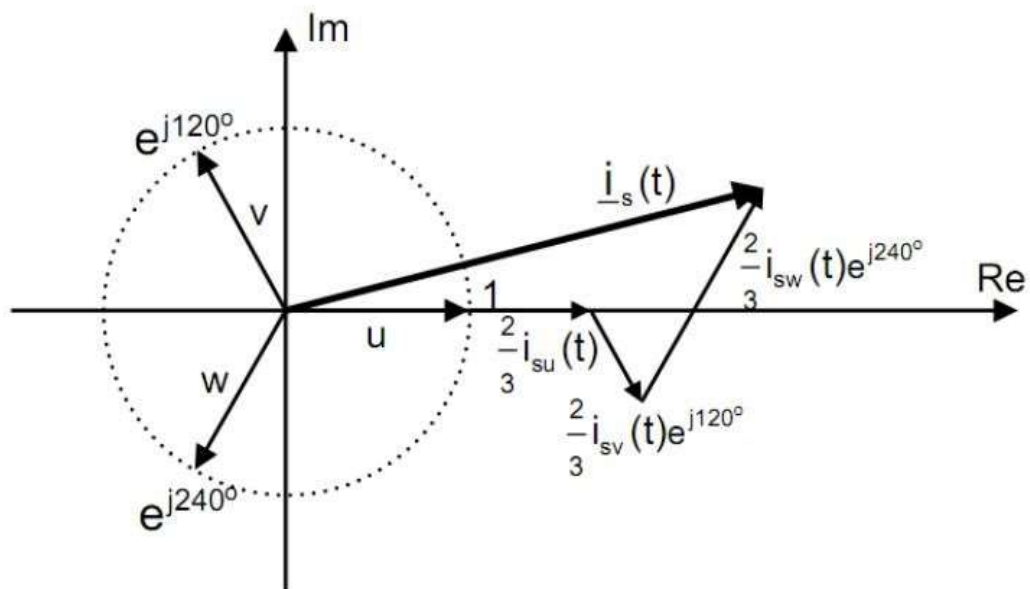


Рисунок 3.13 – Просторовий вектор струму статора

Назвемо вказану вище комплексну систему координат, системою координат

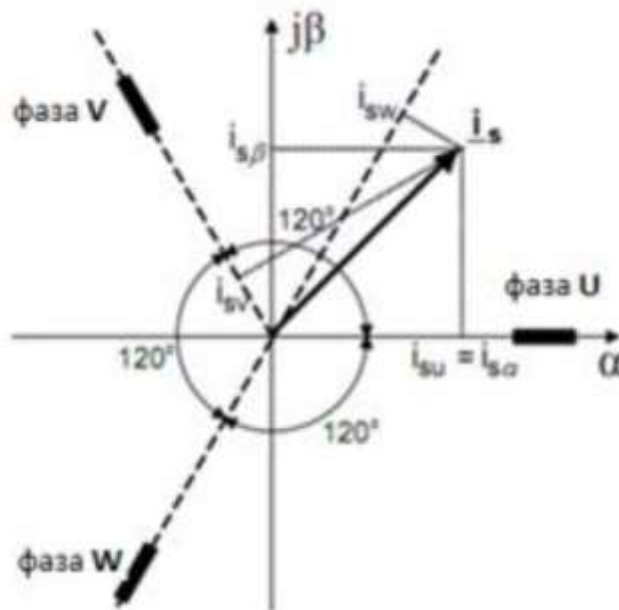


Рисунок 3.14 – Струм статора у вигляді просторового вектора у системі координат

Для синхронної машини з постійними магнітами збудуємо систему координат dq, в якій напрямок дійсної осі d збігається з віссю полярного потоку, а початок координат збігається з початком системи. Ця система координат обертається навколо початку координат з кутовою швидкістю, яка є механічною швидкістю ротора, яка також є швидкістю i_s .

$$\begin{cases} i_s^s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \\ i_s^f = i_{sd} + j i_{sq} \end{cases} \quad (3.9)$$

Де i_{sd} , i_{sq} - це дві компоненти вектора струму статора $i_s(t)$

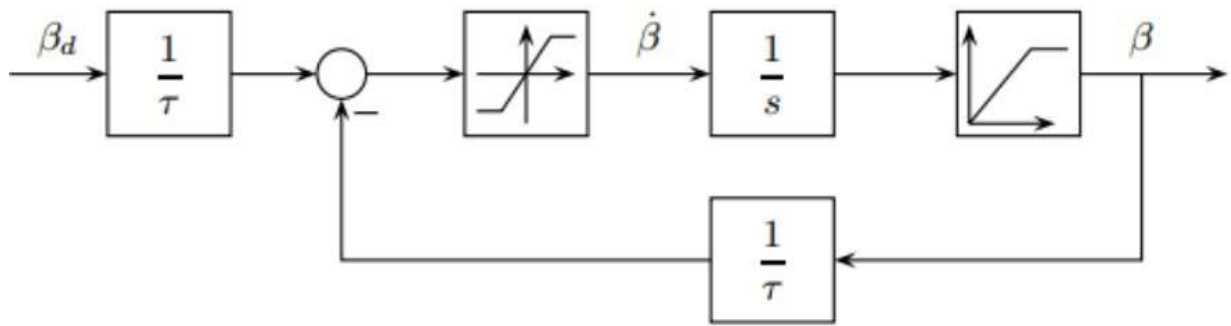


Рисунок 3.16 – Модель привода кута атаки

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_d \quad (3.10)$$

де β_d - Фактичний і бажаний кут атаки, відповідно.

Регулювання потужності може вимагати швидкої та великої корекції кута атаки. Таким чином, обмеження на швидкість зміни та амплітуду кута атаки мають великий вплив на характеристики регулювання потужності. Для зниження ризику втомних ушкоджень ці межі не повинні досягатися під час нормальної роботи турбіни.

3.5 Висновки до розділу

Виконавши аналіз методів керування вітроелектространцією можна стверджувати, що регулювання кута атаки є важливим рішенням ефективності роботи вітрогенератора.

Вітрогенератор з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки (FS-FP) є конфігурацією, де покращити ефективність за допомогою активного керування неможливо. Ці турбіни регулюються за допомогою пасивних методів при високих швидкостях вітру. Вибір передавального числа редуктора стає

важливим для такого пасивного регулювання, оскільки він гарантує, що номінальна потужність не буде перевищена.

Вітрогенератор зі змінною швидкістю та змінним кутом атаки (VS-VP) при роботі нижче від номінальної швидкості вітру змінна швидкість і фіксований кут атаки використовуються для максимального отримання енергії та підвищення якості електроенергії. При роботі вище за номінальну швидкість вітру фіксована швидкість і змінний кут атаки дозволяють ефективно регулювати потужність.

Проаналізована крива потужність від швидкості вітру, показала, що:

- в районах з низькою швидкістю вітру, коли швидкість вітру збільшується, генеруюча потужність збільшується і завжди нижче робочої потужності;
- коли швидкість вітру досягає робочої швидкості вітру, якщо швидкість вітру збільшується, потужність, що генерує, не змінюється;
- коли швидкість вітру перевищує робочий діапазон швидкостей вітру, потужність дорівнює 0.

Було здійснене моделювання системи вітрогенератора, яка включає основні підсистеми: механічну, аеродинамічну вітротурбіну, електрогенератор та підсистему керування кутом атаки.

4 Розрахунок навантаження на систему

4.1 Регулятор для керування струмом генератора

Один із типів регуляторів — пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, який генерує керуючий сигнал як суму трьох складових: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Блок-схема ПІД регулятора представлена на рисунку 3.1.

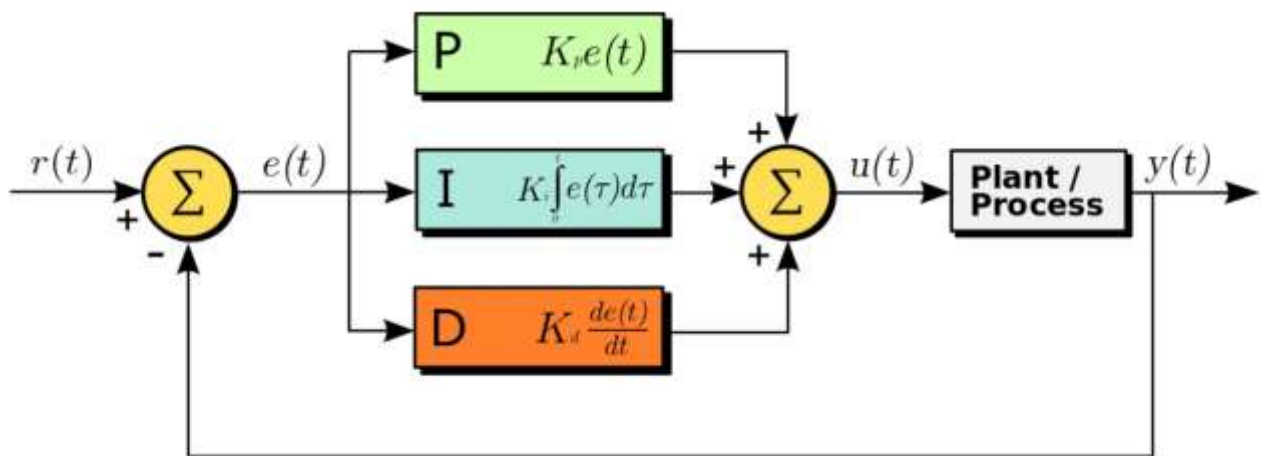


Рисунок 4.1 – Блок-схема ПІД регулятора

$$P = K_p \cdot e(t) \quad \text{Пропорційна;}$$

$$I = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

$$D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Інтегральна;}$$

Диференціальна складові закону керування, який у підсумковому вигляді описується такими формулами:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

$$u(t) = P + I + D = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Пропорційна складова (P) має недолік, оскільки при використанні пропорційного закону керування регулятор не досягає стабільності на заданому значенні. Крім того, збільшення коефіцієнта пропорційності завжди призводить до виникнення автоколивань. Через це для досягнення стабільного керування до пропорційного закону часто додаються інтегральна та диференціальна складові.

Інтегральна складова I накопичує (інтегрує) помилку регулювання, що дозволяє ПІД-регулятору усувати статичну помилку (помилка, що встановилася, залишкове неузгодження). Або іншими словами: інтегральна ланка завжди вносить деяке зміщення і якщо система схильна до деяких постійних помилок, то їх компенсує (за рахунок свого зміщення). А от якщо цих помилок немає або вони зневажливо малі, то ефект буде зворотним — інтегральна складова сама вноситиме помилку зміщення. Саме тому її не використовують, наприклад, у завданнях надточного позиціонування. Ключовим недоліком інтегрального закону керування ефект насичення інтегратора.

Диференційна складова D пропорційна темпу зміни відхилення регульованої величини та призначена для протидії відхиленням від цільового значення, які прогнозуються у майбутньому. Примітно те, що диференціальна компонента усуває загасаючі коливання. Диференціальне регулювання особливо ефективно для процесів, які мають великі запізнення. Недоліком диференціального закону керування є його нестійкість до впливу шумів.

Якість системи залежить від параметрів K_p , K_i , K_d . Для отримання бажаної якості системи необхідно аналізувати об'єкт і на цій основі вибрати відповідні параметри. В даний час існує досить багато методів для визначення параметрів ПІД-регулятора, таких як:

- метод Циглера-Ніколса.

(4.2)

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- метод Чієна-Хронеса-Ресвіка.
- метод Т-суми Куна.
- метод оптимізації величини та метод оптимізації симетрії.
- метод оптимізації помилки стеження.

У жодному разі не обов'язково визначати всі три параметри. Наприклад, коли сам об'єкт має інтегральну складову, то у контролері нам не потрібно додавати інтегральну складову, тобто просто використовувати PD-контролер. І коли сигнал у системі змінюється повільно, а сам регулятор не повинен дуже швидко реагувати на зміни статичного усунення, ми можемо використовувати Прегулятор.

Таким чином, залежно від ситуації можуть застосовуватися П-, ПД-, ПІ- та

ПІД-регулятори, але основним законом керування в основному є пропорційний (хоча в деяких специфічних завданнях і можуть (4.3) використовуватися виключно ланки диференціаторів та інтеграторів).

Напруги по осі dq для синхронного генератора з постійними (4.4) магнітами можуть бути записані в часовій області як:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_{sq} i_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega(L_{sd} i_{sd} + \lambda)$$

Використовуючи перетворення Лапласа цих рівнянь, ми отримуємо еквівалент у частотній ділянці у вигляді:

$$V_{sd}(s) = (R_s + sL_{sd})i_{sd}(s) - \omega L_{sq} i_{sq}(s) \quad (4.5)$$

$$V_{sq}(s) = (R_s + sL_{sq})i_{sq} + \omega(L_{sd}i_{sd}(s) + \lambda) \quad (4.6)$$

Таким чином, машина може бути представлена наступною функцією передачі:

$$G_d(s) = \frac{1}{R_s + L_{sd}s} \quad (4.8)$$

$$G_q(s) = \frac{1}{R_s + L_{sq}s}$$

ПІ-регулятор використовується для встановлення струму по осі d на нуль. У системі існує час затримки датчика та час затримки обчислень. Тому запроваджуємося тимчасова затримка першого порядку. На рисунках 4.2 і 4.3 представлена блок-схема керування струмом по осях d, q:

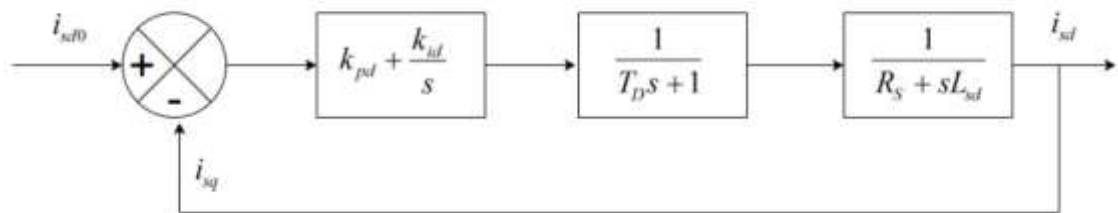


Рисунок 4.2 – Блок-схема керування струмом i_{sd}

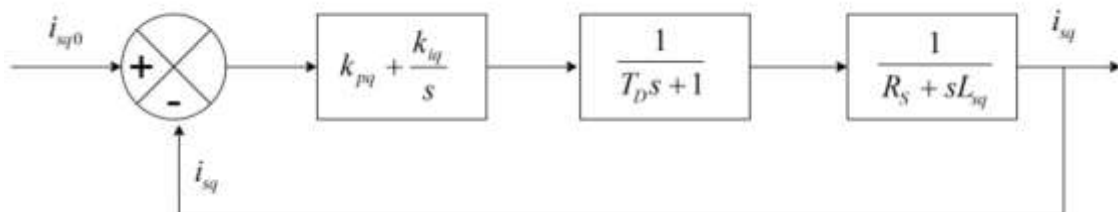


Рисунок 4.3 – Блок-схема керування струмом i_{sq}

Розрахуємо параметри ПІ регулювання струмом i_{sd} , передавальна функція

$$G_0(s) = (k_{pd} + \frac{k_{id}}{s}) \cdot \frac{1}{1 + sT_D} \cdot \frac{1}{R_S + sL_{sd}}$$

$$K_{ip} = \frac{k_{id}}{k_{pd}} = \frac{R_S}{L_{sd}}, \text{ тоді}$$

$$G_0(s) = (k_{pd} + \frac{k_p K_{ip}}{s}) \cdot \frac{1}{1 + sT_D} \cdot \frac{1}{R_S + sL_{sd}} = \frac{k_p}{T_D L_{sd}} \cdot \frac{1}{s(s + \frac{1}{T_D})}$$

$$K = \frac{k_p}{T_D L_{sd}} \text{ тоді}$$

відкритого циклу задається так:

Якщо

$$G_0(s) = \frac{K}{s(s + \frac{1}{T_D})} \quad (4.10)$$

Передатна функція закритого циклу $G_{sd}(s)$, задається наступним рівнянням:

$$G_{sd}(s) = \frac{G_{0d}(s)}{1 + G_{0d}(s)} = \frac{K}{s^2 + \frac{1}{T_D}s + K} \quad (4.11)$$

Загальні рівняння системи другого порядку має вид:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.12)$$

За методикою порівняння коефіцієнтів рівнянь (4.11) (4.12), отримаємо:

$$\omega_{nd} = \sqrt{K}$$

$$\zeta = \frac{1}{2T_D \sqrt{K}},$$

Вибрати максимальне відсоткове значення перевищення рівне 2%, $T_D=0.3$ с, отримаємо $\zeta=0,78$ та D дорівнює 2%.

Для розрахунку коефіцієнти регулятора ПІ використовуємо параметри синхронного генератора із постійними магнітами [8] $k_{pd} = 0,45$, $k_{id} = 0,1$.

Застосовуючи також для струму i_{sq} , отримаємо параметри регулятора: $k_{pq}=0,297$, $k_{id}=0,109$.

4.2 Розробка спостерігача крутного моменту

Спостерігача Луенбергер: Розглянемо об'єкт із моделлю стану:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}, \quad (4.16)$$

Основна ідея методу проектування спостерігача Люенбергера складається в тому, щоб використовувати систему з моделлю як спостерігач для отримання наближення короткої інтервал часу T , тобто для отримання виразу коли $t \geq T$. На рисунку 4.4 представлена модель спостерігача стану Луенбергера. \quad (4.13)

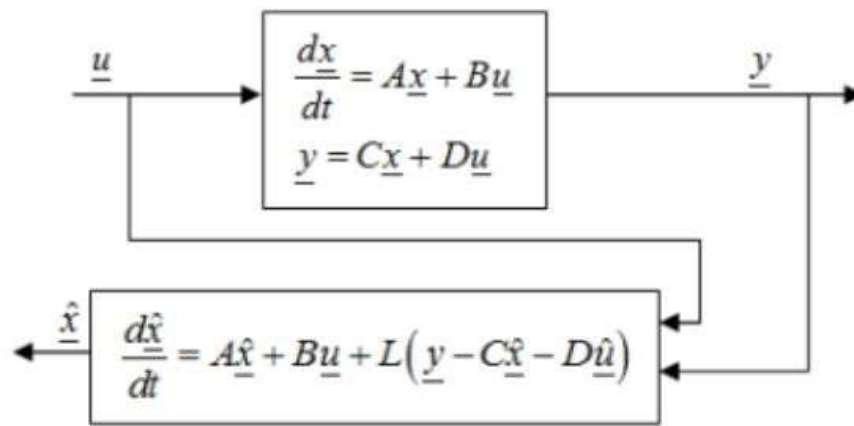


Рисунок 4.4 – Модель спостерігача стану Луенбергера

На основі двох моделей створено помилку:

$$\underline{e}(t) = \underline{x}(t) - \underline{\hat{x}}(t) \rightarrow \frac{d\underline{e}}{dt} = \frac{d(\underline{x} - \underline{\hat{x}})}{dt} = A(\underline{x} - \underline{\hat{x}}) - L(\underline{y} - C\underline{\hat{x}} - D\underline{u}) = A\underline{e} - L(C\underline{x} - C\underline{\hat{x}}) = (A - LC)\underline{e} \quad (4.16)$$

Так якщо $\underline{e}(t) \rightarrow 0$, то $(A - LC)$ має бути стійкою матрицею. Чим швидше помилка $\underline{e}(t)$ буде наближатися до нуля, тобто чим менший час T , необхідне спостереження за вхідним і вихідним сигналами, далі від уявної осі (в $-\infty$) власні значення $(A - LC)$.

Спостерігача Калман: для спостерігача стану Луенбергера можемо виявити зміну стану $\underline{x}(t)$ в об'єкті лише через певний час T . Це обмежило його застосовність, т. е. його можна використовувати лише тоді, коли обурення, що впливає на систему, є миттєвим, а інтервал часу між двома обуреннями не менше T .

Для того, щоб повністю усунути зазначену нестачу спостерігача Луенбергера, Калман запропонував враховувати участь шумових сигналів $\underline{u}_x(t)$ і $\underline{u}_y(t)$ об'єкта у процесі визначення примарної відповідності L спостерігача. Тобто модель опису об'єкта має показувати участь шумових сигналів. На рисунку 3.5 представлено модель спостерігача стану Калмана.

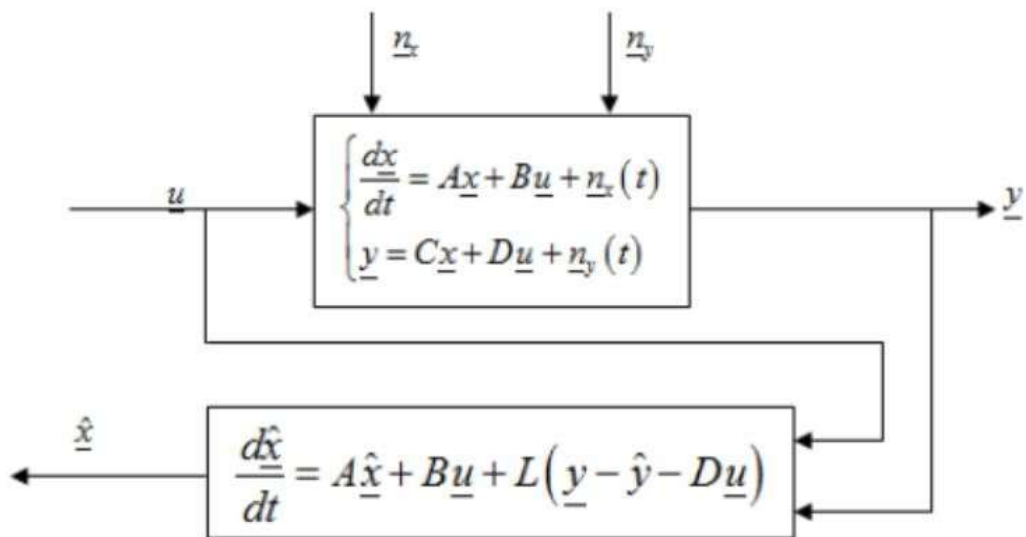


Рисунок 4.5 – Модель спостерігача стану Калмана

Спостерігачі стану Калмана має ту саму модель, що спостеріг стану Луенбергера, тобто

$$\frac{dz}{dt} = Az + Bu + L(y - Cz - Du) \quad (3.18)$$

Так алгоритм визначення L для спостерігача стану Калмана складається з наступних кроків:

- 1) Визначати матрицю N_x і N_y
- 2) Розробити оптимальний контролер, що реагує на стан LT з негативним зворотним зв'язком для подвійних об'єктів:

$$\frac{dx}{dt} = A^T x + C^T u \quad (3.19)$$

І об'єктивна функція:

$$Q_K = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T N_x x + u^T N_y u) dt \quad (3.20)$$

- 3) Підставте знайдене L (3.18), щоб отримати спостерігача.

Моделювання спостерігача вітрового моменту розраховується так:

$$\dot{\omega} = -\frac{3p^2}{2J} \lambda i_{qs} - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{j} T_L, \quad (3.21)$$

Модель стану об'єкта:

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{T}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega \\ T_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{3p^2}{2J} \\ 0 \end{pmatrix} i_{qs} \quad \begin{matrix} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{matrix}, \quad (3.22)$$

Модель

спостерігача:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y} - Du) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases}$$

$$\dot{e} = (A - LC)e,$$

$$\hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{pmatrix}; e = x - \hat{x}; L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix}.$$

де

На рисунку 4.6 представлений спостерігач вітрового моменту.

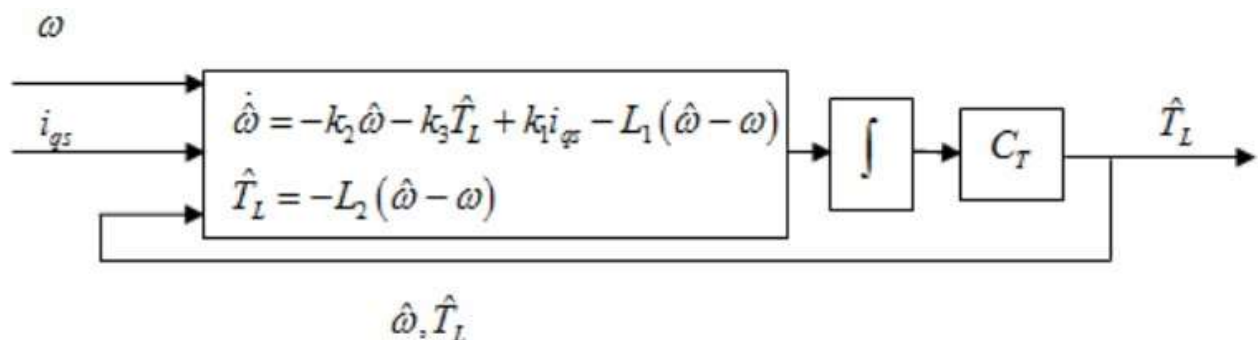


Рисунок 4.6 – Спостерігач вітрового моменту

Результати моделювання видно, що коли швидкість вітру змінюється кут атаки змінюється на відповідне значення кута. Тобто коли швидкість вітру підвищується від 4 м/с до 11,8 м/с (номінальна швидкість), то кут атаки дорівнює 0 і потужність генератора підвищується від 0 до 2 МВт; коли швидкість вітру вище 11,8 м/с, потужність генератора досягає максимальне значення 2 МВт (Максимальна потужність генератора).

Також спостерігач крутного моменту вітру добре працює в області, що перевищує номінальну швидкість вітру ($> 11,8$ м/с), але час відгуку спостерігача ще довго не підходить для області швидкості вітру нижче номінальної швидкості, коли швидкість вітру змінюється швидко.

4.3 Висновки до розділу

У цьому розділі проведено моделювання розробленої системи керування вітрогенератором. На основі аналізів результатів показано залежність потужності від швидкості вітру та кут атаки. Ця система працює добре в області, яка перевищує номінальну швидкість вітру.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі зроблено кілька важливих висновків, які підсумовують основні етапи дослідження та досягнуті результати.

В рамках дослідження було розглянуто та змодельовано систему керування вітрогенератором, спрямовану на оптимізацію процесу перетворення вітрової енергії в електричну. Обрана для дослідження система, що використовує синхронний генератор з постійними магнітами (СГПМ), показала високу ефективність і дозволила значно підвищити стабільність роботи генератора в умовах змінної швидкості вітру.

Моделювання в середовищі Simulink підтвердило залежність між швидкістю вітру, кутом атаки та потужністю генератора. Результати показали, що система здатна ефективно працювати навіть при швидкостях вітру, що перевищують номінальні, що вказує на підвищену ефективність перетворення вітрової енергії в електричну. Така ефективність досягається завдяки адаптивності системи керування, яка забезпечує максимальну потужність генератора в умовах змінного вітрового потоку.

Крім того, особливу увагу було приділено вдосконаленню системи керування струмом генератора за допомогою ПД-регулювання, що дозволило підвищити точність і стабільність роботи вітрогенератора. Розробка спостерігача крутного моменту також сприяла кращому управлінню і оптимізації роботи генератора. Отже, результати роботи підтвердили, що розроблена система керування є високоефективною і придатною для застосування в реальних умовах, забезпечуючи підвищену продуктивність вітрогенераторів у різних вітрових умовах.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вітроенергетика. Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/ae/windenergy>.
2. Вертикальний вітрогенератор. Режим доступу: <http://www.ecosvit.net/ua/vertical-windgenerator-800w>.
3. Лабораторія незалежних досліджень. Режим доступу: <http://imlab.narod.ua/index.html>.
4. Сміт, Дж. Р., і Джонсон, А. Б. Вітрові турбіни з вертикальною віссю: історія, технологія та застосування, 2015. – 97 ст.
5. Алі, С. С., Сюй, Б. Огляд вітрової турбіни з вертикальною віссю: потужність і структурний аналіз (частина 1), 2018. - 915-929 ст.
6. Спера, Д. А. Технологія вітрових турбін: Основні концепції техніки вітрових турбін (2-е видання), 2009. – 101 ст.
7. Бертон, Т., Шарп, Д., Дженкінс, Н., і Босані, Е. Проектування та оптимізація вертикальної вітрової турбіни: огляд. Енергії, 2019. – 47 ст.
8. Чен, С. Проектування та аналіз вітрових турбін з вертикальною віссю, 2018. – 41 ст.
9. Нетрадиційні джерела енергії. Режим доступу: <https://eenergy.com.ua/baza-znan/netradytsijni-dzherela-energiyi/>.
10. Українська асоціація підприємств легкої промисловості. Режим доступу: <https://ukrlegprom.org/ua/>.
11. Заявка Великобританії № 1600243, МКИ F03D7/00, 2022р.
12. Паращивой, І. Дизайн вітрової турбіни: з акцентом на концепції Дар'є, 2002. – 25 ст.
13. Вітряки класичні (горизонтальні). Режим доступу: <https://kworum.com.ua/c/vitriaki-klasychni>.
14. Вітрові електростанцій Британії. Режим доступу: <https://www.radiosvoboda.org/a/24562793.html>.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

15. Чонг, В. Т., і Фазлізан, А. Вітрові турбіни: проектування, керування та застосування. IntechOpen, 2018. – 54 ст.
16. Горизонтальні вітрогенератори. Режим доступу: <http://www.ecosvit.net/ua/gorizontaljni-vitrogeneratori-vitrovi-elektrostantsii-vitryak>.
17. Магістрів Г. М. Відновлювані та ефективні електроенергетичні системи, 2010. – 62 ст.
18. Манвелл, Дж. Ф., Макгоуен, Дж. Г., і Роджерс, А. Л. Пояснення вітрової енергії: теорія, дизайн і застосування, 2009. – 114 ст.
19. Хансен, М. О. Л. Аеродинаміка вітрових турбін Routledge, 2015. – 79 ст.
20. Малопотужний вітрогенератор, особливості використання. Режим доступу: http://faetonukr.blogspot.com/2009/06/blog-post_25.html.
21. Манвелл, Дж. Ф., Макгоуен, Дж. Г., і Роджерс, А. Л. Пояснення вітрової енергії: теорія, дизайн і застосування, 2010. – 17 ст.
22. Гаш Р. і Твел Дж. Вітрові електростанції: основи, проектування, будівництво та експлуатація, 2018. – 87 ст.
23. Еріх Гау. (2005). Вітрові турбіни: основи, технології, застосування, економіка, 2005. – 96 ст.
24. Бертон Т., Дженкінс Н., Шарп Д. та Босані Е. Довідник з вітроенергетики, 2001. – 32 ст.
25. Основи вітроенергетики. Режим доступу: <https://gidrotehnka.com.ua/ua/a339386-что-nuzhno-znat.html>.

ДОДАТОК А

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		