

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Островський Андрій Васильович
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Комп'ютерно-інтегрована система управління автономною мікровітроделектростанцією/ Computer-integrated control system of an autonomous micro-wind power plant затверджені наказом по університету від 1 грудня 2025р. №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз сучасного стану досліджень у сфері відновлюваної вітрової енергетики.
 - 1.1. Дослідження глобальних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики та перспектив використання вітрових електростанцій.
 - 1.2. Аналіз принципів побудови та функціонування автоматизованих систем управління вітровими турбінами.
2. Технічні компоненти системи керування вітроелектростанцією.
 - 2.1. Дослідження типів генераторів, що застосовуються у вітрових енергетичних установках.
 - 2.2. Аналіз SCADA-систем моніторингу та управління об'єктами вітрової енергетики.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку відновлюваної вітрової енергетики та визначити перспективні напрями її впровадження.
2. Дослідити принципи побудови автоматизованих систем управління вітровими турбінами та оцінити ефективність їх використання.
3. Виконати аналіз технічних компонентів вітроелектростанції та обґрунтувати вибір обладнання для системи керування.
4. Дослідити функціональні можливості SCADA-систем та засобів автоматизованого контролю параметрів роботи вітроелектростанції.

5. Розробити алгоритм управління режимами роботи вітрової турбіни.
6. Реалізувати математичну та імітаційну модель системи управління у середовищі MATLAB/Simulink.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Блок-схема алгоритму управління вітровою турбіною

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Я.М. Николайчук д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
2	Я.М. Николайчук д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
3	Я.М. Николайчук д.т.н., професор, професор кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ВІДНОАЛЮВАЛЬНОЇ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	01.12.2025-15.01.2026	виконано
2	ТЕХНІЧНІ КОМПОНЕНТИ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	16.01.2026-15.03.2026	виконано
3	РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ	16.03.2026-30.04.2026	виконано
4.	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026-25.05.2026	виконано

Студент

Андрій ОСТРОВСЬКИЙ

(підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Ярослав НИКОЛАЙЧУК

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Островський А.В. Комп'ютерно-інтегрована система управління автономною мікровітroeлектростанцією /. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено комп'ютерно-інтегровану систему управління автономною мікровітroeлектростанцією. Досліджено принципи побудови автономних мікровітroeлектростанцій. Проаналізовано сучасні підходи та компоненти для реалізації система управління мікровітroeлектростанцій.

ABSTRACT

Ostrovskyi A.V. Computer-integrated control system for an autonomous micro wind power plant. – Manuscript.

Thesis for the Bachelor's degree in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics," educational and professional program "Automation and Computer-Integrated Technologies" – West Ukrainian National University. Ternopil, 2026.

The work develops a computer-integrated control system for an autonomous micro wind power plant. The principles of constructing autonomous micro wind power plants are investigated. Modern approaches and components for the implementation of micro wind power plant control systems are analyzed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ВІДНОАЛЮВАЛЬНОЇ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	12
1.1. Дослідження глобальних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики.....	12
1.2 Дослідження автоматизованої системи управління вітровою турбіною.....	19
1.3 Дослідження типів вітрових турбін.....	29
2. ТЕХНІЧНІ КОМПОНЕНТИ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	39
2.1 Дослідження типів генераторів вітрових турбін.....	39
2.2 Дослідження SCADA систем управління вітровою енергетикою.....	49
2.3 Дослідження засобів вимірювання та керування нижнього і середнього рівнів системи вітроелектростанції.....	58
3. РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ	69
3.1 Реалізація системи управління станом коліс та двигунами робота.....	69
3.2 Розробка Simulink моделі управління вітровою турбіною.....	76
3.3 3.3 Реалізація алгоритму управління вітровою турбіною.....	82
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95
Додаток А.....	99

					ДП.АКІТ.10659726.00.0000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Островський			Комп'ютерно-інтегрована система управління автономною мікровітроелектростанцією	Літ.	Арк.
Перевір.		Гуменний П.В.					6
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42 ₄	
Н. Контр.		Заставний О.					
Затверд.		Сегін А.І.					

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління
 КІСУ – комп’ютерно-інтегрована система управління
 МВЕС – мікровітроделектростанція
 ВДЕ – відновлювані джерела енергії
 БЕУ – вітроенергетична установка
 ВЕС – вітроелектростанція
 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського керування та збору даних
 IoT (Internet of Things) – інтернет речей
 PLC (Programmable Logic Controller) – програмований логічний контролер
 ПЛК – програмований логічний контролер
 HMI (Human Machine Interface) – людино-машинний інтерфейс
 MPPT (Maximum Power Point Tracking) – алгоритм відстеження точки максимальної потужності
 PWM (Pulse Width Modulation) – широтно-імпульсна модуляція
 PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) – синхронний генератор із постійними магнітами
 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) – асинхронний генератор із подвійним живленням
 SCIG (Squirrel Cage Induction Generator) – короткозамкнений асинхронний генератор
 SG (Synchronous Generator) – синхронний генератор
 LVRT (Low Voltage Ride Through) – режим роботи при короткочасному провалі напруги
 HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) – горизонтально-осьова вітрова турбіна
 VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) – вертикально-осьова вітрова турбіна
 CF (Capacity Factor) – коефіцієнт використання встановленої потужності
 LCOE (Levelized Cost of Energy) – нормована вартість виробництва електроенергії
 CAPEX (Capital Expenditures) – капітальні витрати
 OPEX (Operating Expenditures) – експлуатаційні витрати
 AEP (Annual Energy Production) – річне виробництво електроенергії
 GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування
 Smart Grid – інтелектуальна електрична мережа
 η – коефіцієнт корисної дії
 C_p – коефіцієнт використання енергії вітру
 λ – коефіцієнт швидкості ротора
 ω – кутова швидкість ротора, рад/с
 ρ – густина повітря, кг/м³
 P – потужність, Вт
 U – напруга, В
 I – сила струму, А

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний розвиток енергетики характеризується зростанням потреби у використанні відновлюваних джерел енергії, що зумовлено як глобальними екологічними викликами, так і необхідністю підвищення енергетичної незалежності держав. В умовах енергетичних загроз, спричинених військовою агресією Російської Федерації проти України, питання забезпечення автономного та надійного електропостачання набуває особливої актуальності. Пошкодження енергетичної інфраструктури та нестабільність централізованих мереж обумовлюють необхідність розвитку локальних автономних джерел генерації електроенергії.

Одним із перспективних напрямів є використання мікровітroeлектростанцій, які дозволяють забезпечити електроенергією окремі об'єкти, домогосподарства, критичну інфраструктуру та віддалені території. Такі системи можуть функціонувати автономно або в складі гібридних енергетичних комплексів, що поєднують різні джерела генерації.

Разом із тим, ефективне функціонування автономних мікровітroeлектростанцій неможливе без застосування сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем управління. Такі системи забезпечують оптимальне перетворення енергії вітру, стабілізацію вихідних параметрів електроенергії, керування режимами роботи, моніторинг технічного стану обладнання та адаптацію до змінних умов навколишнього середовища. Впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем управління передбачає використання методів автоматичного керування, мікропроцесорної техніки, сенсорних систем, засобів зв'язку та алгоритмів обробки даних у реальному часі.

Таким чином, розробка ефективної комп'ютерно-інтегрованої системи управління автономною мікровітroeлектростанцією є актуальним науково-прикладним завданням, що має важливе значення як для енергетичної

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпеки України, так і для розвитку сучасних технологій відновлюваної енергетики.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування автономної мікровітroeлектростанції шляхом розробки комп'ютерно-інтегрованої системи управління, що забезпечує стабільну, надійну та оптимізовану генерацію електроенергії в умовах змінної швидкості вітру.

Завдання кваліфікаційної роботи. Для досягнення поставленої мети у дипломній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку відновлюваної енергетики, зокрема мікровітroeлектростанцій, та визначити основні напрями їх застосування.
2. Дослідити принципи роботи вітроенергетичних установок малої потужності та проаналізувати їх конструктивні особливості.
3. Виконати аналіз основних компонентів системи управління мікровітroeлектростанцією, зокрема сенсорів, генераторів, перетворювачів, накопичувачів енергії та обчислювальних модулів.
4. Проаналізувати сучасні підходи до побудови комп'ютерно-інтегрованих систем управління, включаючи SCADA та IoT-рішення.
5. Розробити алгоритм управління режимами роботи мікровітroeлектростанції з урахуванням змінних параметрів вітрового потоку.
6. Створити математичну модель мікровітroeлектростанції та реалізувати імітаційну модель у середовищі Simulink для дослідження її роботи.

Об'єкт дослідження – процеси генерації та управління електроенергією в автономних мікровітroeлектростанціях.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби комп'ютерно-інтегрованого управління автономними вітроенергетичними установками.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження. У роботі використовуються методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання енергетичних процесів, а також методи розробки вбудованих систем управління.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена комп'ютерно-інтегрована система управління може бути використана при проектуванні автономних мікровітroeлектростанцій для забезпечення електроенергією приватних домогосподарств, об'єктів критичної інфраструктури та віддалених територій. Запропоновані алгоритми та структурні рішення сприяють підвищенню ефективності використання вітрової енергії, надійності роботи системи та стабільності енергопостачання, а також можуть бути використані у подальших дослідженнях у галузі відновлюваної енергетики.

Апробації. Островський А.В. Комп'ютерно-інтегрована система управління автономною мікровітroeлектростанцією/ А.В. Островський, Н. Леник, Д. Коробов, П.В. Гуменний // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. с.148-152.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ВІДНОАЛЮВАЛЬНОЇ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1. Дослідження глобальних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики

Початок ХХІ століття характеризується глибокою трансформацією світової енергетичної системи. Протягом останніх десятиліть відновлювані джерела енергії (ВДЕ) еволюціонували від другорядного напрямку до одного з ключових чинників розвитку глобальної енергетики. Така зміна зумовлена комплексом причин, серед яких визначальними є зниження вартості технологій генерації, посилення уваги суспільства та урядів до проблем зміни клімату, а також геополітичні потрясіння, що виявили вразливість енергетичних систем, залежних від імпорту викопних ресурсів.

Згідно з «прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, вже у 2025 році відновлювані джерела енергії випередять вугілля за обсягами виробництва електроенергії та стануть провідним джерелом генерації у світі. Очікується, що до 2028 року їхня частка у глобальному виробництві електроенергії перевищить 42%» [1].

За інформацією «Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), у 2025 році приріст встановлених потужностей ВДЕ становив 692 ГВт, що забезпечило досягнення сумарного показника на рівні 5149 ГВт. При цьому обсяг нових «зелених» потужностей зріс на 15,5% у порівнянні з попереднім роком, а частка відновлюваних джерел у загальному введенні генеруючих потужностей досягла 85,6%» [2].

Аналіз «структури приросту потужностей свідчить про домінування сонячної та вітрової енергетики. Зокрема, сонячна генерація забезпечила введення близько 511 ГВт нових потужностей, що становить переважну частину загального приросту, тоді як вітрова енергетика додала ще 159 ГВт. У сукупності ці два напрями сформували понад 96% загального приросту відновлюваних джерел у 2025 році» [2].

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасний етап «розвитку енергетичної галузі також відзначається різким збільшенням обсягів інвестування у сектор відновлюваної енергетики. Така динаміка є прямим наслідком переходу до низьковуглецевої економіки. В умовах загострення кліматичних проблем, нестабільності ринків традиційних енергоносіїв та зростання вимог до енергетичної безпеки, держави активно нарощують фінансування проєктів у сфері «зеленої» генерації» [2].

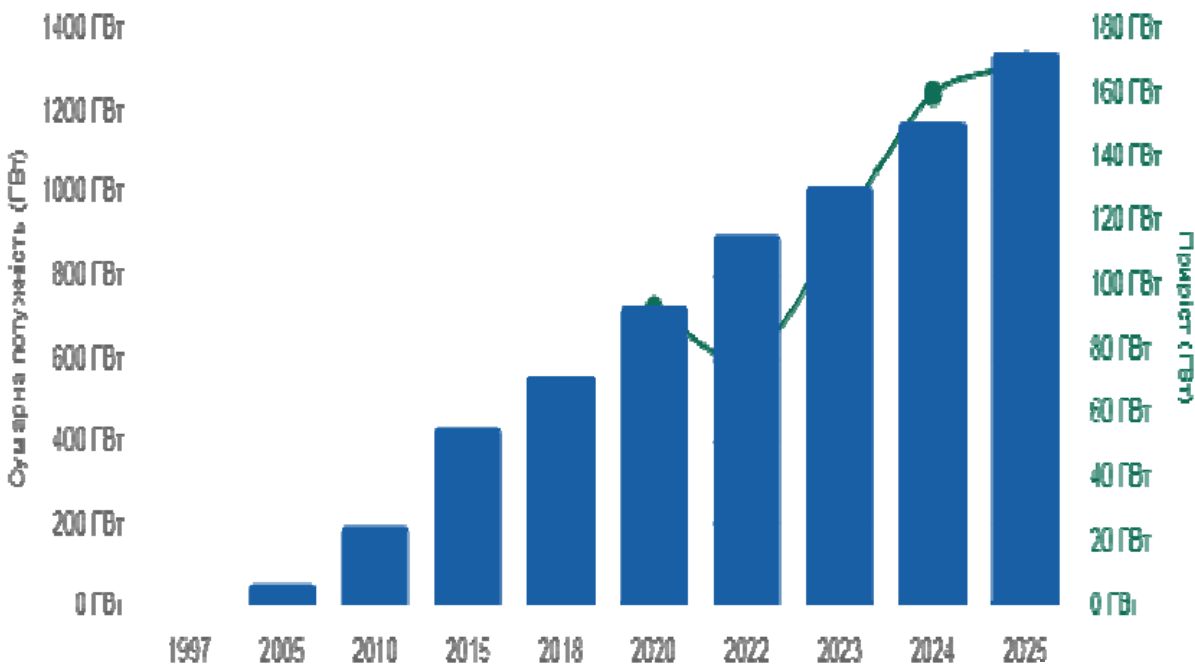


Рисунок 1.1- Зростання вітрової енергетики у світі

Протягом «останніх років у світовій енергетиці спостерігається стійка тенденція до зростання інвестицій у сектор відновлюваних джерел енергії. Зокрема, у 2024 році обсяг фінансування ВДЕ досяг рекордного рівня — приблизно 735 млрд доларів США. Основна частка цих капіталовкладень була спрямована на розвиток сонячної фотоелектричної та вітрової генерації, які на сьогодні є найбільш технологічно розвиненими та економічно доцільними напрямками» [4].

Уже у 2025 році відбулося суттєве зростання інвестицій, внаслідок чого їх загальний обсяг досяг близько 3,3 трлн доларів США. Така динаміка свідчить про глибоку трансформацію структури світових енергетичних інвестицій, у межах якої відновлювані джерела поступово витісняють

традиційні види генерації. При цьому обсяг фінансування ВДЕ більш ніж удвічі перевищує вкладення у викопну енергетику, що підкреслює стратегічну спрямованість глобального енергетичного розвитку.

Активізація «інвестиційної діяльності зумовлена сукупністю взаємопов'язаних факторів, серед яких ключову роль відіграють здешевлення технологій генерації, розвиток систем накопичення енергії, впровадження цифрових рішень у функціонування енергетичних мереж, а також державна підтримка у вигляді фінансових стимулів, субсидій та «зелених» тарифів. Додатковим чинником є інтеграція відновлюваних джерел енергії у концепції інтелектуальних мереж (Smart Grid) та децентралізованих енергетичних систем.

Таким чином, аналіз динаміки інвестицій у відновлювану енергетику дозволяє констатувати формування довгострокової тенденції до зростання ролі ВДЕ у світовому енергетичному балансі. Це, у свою чергу, створює передумови для активного розвитку автономних енергетичних рішень, зокрема мікровітroeлектростанцій.

Згідно з аналітичними прогнозами, сумарна генерація електроенергії на основі сонячних та вітрових установок у період з 2023 до 2030 року може зрости майже втричі, забезпечивши понад 90% приросту світового виробництва електроенергії. Очікується, що до 2035 року частка цих технологій перевищить 40% у загальному обсязі генерації. Водночас у Європі прогнозується значне нарощування темпів будівництва вітрових електростанцій, зокрема до 9,5 ГВт офшорних і 22,5 ГВт наземних потужностей щорічно» [3].

У роботі також проведено аналіз розвитку вітрової енергетики в країнах Європейського Союзу (рисунки 1.2), де наведено порівняльну характеристику частки виробництва електроенергії за рахунок вітрової генерації в окремих країнах. Отримані результати дозволяють оцінити рівень впровадження вітроенергетичних технологій та визначити лідерів у цій сфері.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

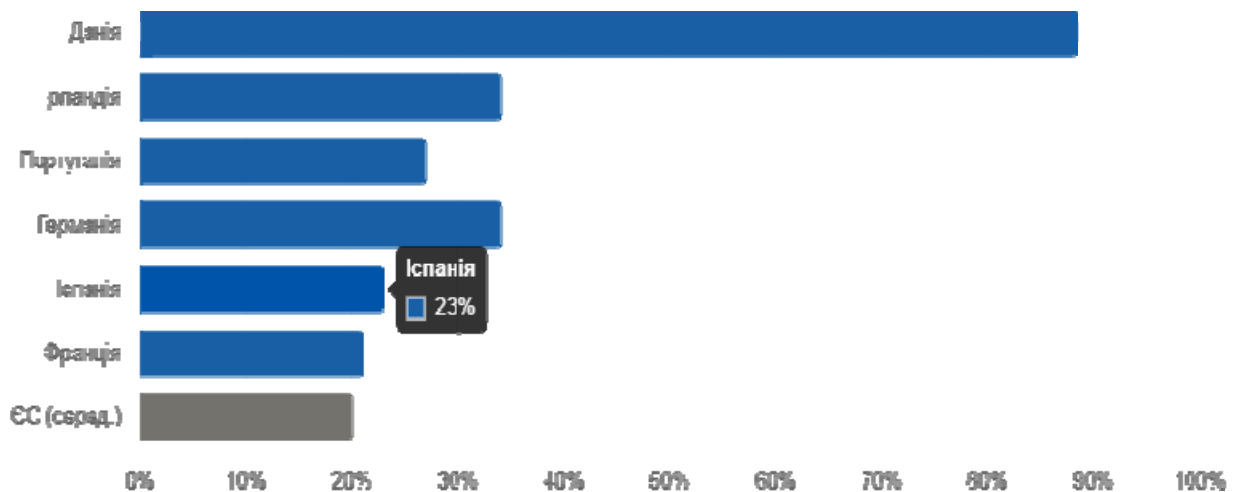


Рисунок 1.2- Розвиток вітрової енергетики у Європі

Найвищий «рівень використання вітрової енергії серед країн Європейського Союзу спостерігається у Данії, де її частка у загальному обсязі виробництва електроенергії перевищує 80%. Такий показник свідчить про високий ступінь інтеграції відновлюваних джерел у національну енергосистему. Водночас дещо нижчі, проте все ще значні значення характерні для Ірландії, Німеччини та Португалії, де частка вітрової генерації перебуває у межах приблизно 25–35%» [5].

Вітрова енергетика займає важливе місце серед технологій відновлюваної генерації. На відміну від сонячної енергетики, вона забезпечує виробництво електроенергії не лише у денний час, але й уночі та в холодні періоди року. Завдяки цьому вона є ефективним доповненням до фотоелектричних систем, що має вирішальне значення при створенні гібридних і автономних енергетичних комплексів.

З позиції «довгострокового розвитку, темпи зростання вітроенергетики є надзвичайно високими. Відповідно до даних IRENA, протягом двох десятиліть встановлена потужність вітрових електростанцій у світі збільшилась майже у 75 разів — з 7,5 ГВт у 1997 році до близько 564 ГВт у 2018 році. Подальша динаміка демонструє стабільне нарощування потужностей: у 2025 році світова вітрова енергетика зростає ще на 169 ГВт, що на 35% перевищує показник попереднього року. Загальний обсяг встановлених потужностей перевищив 1346 ГВт» [4]

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Розвиток «вітрової енергетики має нерівномірний географічний характер. Лідируючу позицію займає Китай, на який припадає близько 77% нових введених потужностей у 2025 році (приблизно 130 ГВт), що майже на половину більше порівняно з попереднім роком. Частка Китаю у світовій вітровій енергетиці досягає близько 50%. Серед інших країн-лідерів варто відзначити Індію, США та Німеччину, які також демонструють значні обсяги введення нових потужностей [6].

Розвиток відновлюваної енергетики в Україні відбувається в особливих умовах, які суттєво відрізняються від глобальних тенденцій. Поряд із загальносвітовим курсом на декарбонізацію, країна змушена долати наслідки повномасштабної війни та масштабних руйнувань енергетичної інфраструктури.

До початку військових дій Україна демонструвала позитивну динаміку розвитку сектору ВДЕ. Загальна встановлена потужність відновлюваних джерел енергії досягала майже 10 ГВт, а обсяг залучених інвестицій перевищував 12 млрд доларів США. Частка «зеленої» генерації у загальному енергобалансі становила понад 8%, причому найбільшу частку формували сонячна та вітрова енергетика» [7].

Однак «внаслідок військової агресії вітроенергетичний сектор зазнав значних втрат. Близько трьох чвертей встановлених потужностей вітрових електростанцій опинилися на тимчасово окупованих територіях південних регіонів України. Станом на початок 2024 року загальна встановлена потужність вітрової генерації становила близько 1,9 ГВт, з яких лише частина — приблизно 583,8 МВт — фактично функціонує та інтегрована в об'єднану енергосистему [8].

Структура відновлюваної енергетики України з урахуванням тимчасово окупованих територій наведена на рисунку 1.3. Незважаючи на складні умови, у 2024 році спостерігалось зростання обсягів виробництва електроенергії з ВДЕ на 6,4% порівняно з попереднім роком, що дозволило досягти частки близько 11% у загальному енергобалансі країни» [9].

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

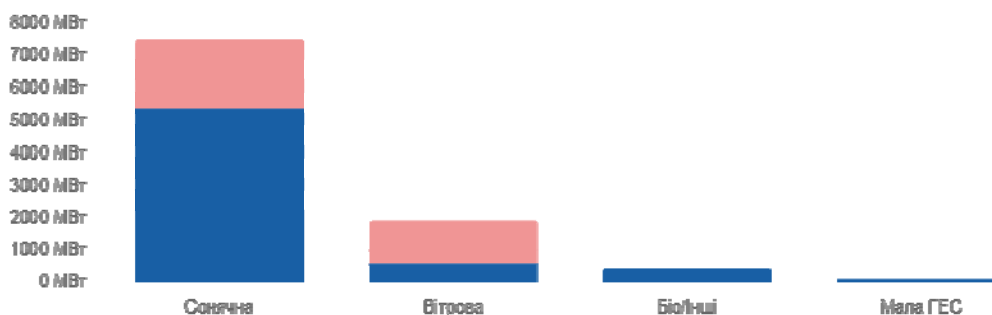


Рисунок 1.3- Розвиток ВДЕ в Україні

Попри складні умови воєнного часу, значення відновлюваних джерел енергії суттєво переосмислюється: від екологічного інструменту вони трансформуються у ключовий фактор енергетичної безпеки та економічної стійкості держави. Використання вітрової, сонячної, біоенергетики, малої гідроенергетики та водневих технологій дозволяє зменшити залежність від імпортованих енергоресурсів, одночасно забезпечуючи конкурентну собівартість виробництва електроенергії порівняно з традиційними викопними джерелами.

В умовах воєнних викликів державна політика підтримки сектору відновлюваної енергетики не лише зберігається, але й адаптується до нових реалій. Зокрема, на 2025 рік визначено квоти розвитку: 33 МВт для сонячної генерації, 250 МВт для вітрової та 47 МВт для інших альтернативних джерел енергії. Встановлені граничні цінові параметри на аукціонах, що становлять близько 8 євроцентів за кВт·год, створюють сприятливі умови для інвестування. Примітно, що саме вітрова енергетика отримала найбільший обсяг квот, що підкреслює її стратегічну важливість у післявоєнному відновленні енергетичної системи.

Серед ключових інфраструктурних ініціатив варто відзначити реалізацію масштабного проєкту Tiligul'ska Wind Farm, який передбачає введення в експлуатацію значних нових генеруючих потужностей. Його впровадження демонструє здатність енергетичного сектору України до розвитку навіть за умов підвищених ризиків і нестабільності.

Паралельно зі зростанням великих вітроенергетичних об'єктів особливої актуальності набуває розвиток малої та мікровітроенергетики.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Установки потужністю до 100 кВт забезпечують ефективне вирішення задач автономного електропостачання, зокрема для віддалених територій, ізольованих об'єктів та критичної інфраструктури. Вони дозволяють формувати незалежні енергосистеми, що функціонують поза межами централізованих мереж.

Діапазон застосування автономних вітрових установок охоплює як малопотужні системи для спеціалізованих потреб (наприклад, морські об'єкти), так і локальні енергомережі для сільських громад. Їх використання є особливо доцільним у регіонах із нестабільним або відсутнім централізованим електропостачанням, а також у випадках сезонних коливань генерації сонячної енергії.

З урахуванням пошкоджень енергетичної інфраструктури України, спричинених військовими діями, роль децентралізованих рішень значно зростає. Мікровітроелектростанції виступають як надійне джерело резервного та автономного живлення, підвищуючи стійкість енергосистеми.

Міжнародні тенденції свідчать про формування нової моделі енергетики, заснованої на інтеграції відновлюваних джерел, систем накопичення енергії та інтелектуальних мереж. У цьому контексті перспективним є поєднання вітрової та сонячної генерації з акумуляторними системами, що забезпечує балансування енергопотоків.

Важливим кроком у цьому напрямі стало затвердження концепції розвитку Smart Grid в Україні, яка передбачає цифровізацію енергомереж, впровадження мікрогрід-систем і створення умов для локальної енергетичної автономії. У такій системі автономні мікровітроелектростанції відіграють важливу роль як елемент децентралізованої генерації.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що відновлювана енергетика вже вийшла за межі нішевих технологій і стала визначальним напрямом глобального інвестиційного розвитку. Вітрова енергетика посідає провідні позиції за темпами введення нових потужностей та забезпечує стабільність енергопостачання протягом року. Незважаючи на значні втрати генеруючих

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужностей, Україна зберігає потенціал для відновлення галузі, а державна політика орієнтована на її активний розвиток. У цьому контексті створення комп'ютерно-інтегрованих систем управління автономними мікровітroeлектростанціями є актуальним і перспективним науково-технічним завданням.

1.2 Дослідження автоматизованої системи управління вітровою турбіною

Автоматизовані системи управління вітровими турбінами є ключовим елементом сучасних вітроенергетичних установок, оскільки саме вони забезпечують ефективне перетворення енергії вітру в електричну енергію в умовах змінних параметрів навколишнього середовища. Вітрова турбіна як складна електромеханічна система функціонує на основі взаємодії аеродинамічних, механічних та електричних процесів, узгоджена робота яких визначає загальну ефективність генерації. Кінетична енергія повітряного потоку передається лопатям ротора, які приводять у рух вал генератора, що, у свою чергу, забезпечує виробництво електроенергії.

Особливістю роботи вітрових установок є значна залежність від швидкості та напрямку вітру, що зумовлює необхідність застосування автоматизованих систем управління. Такі системи забезпечують адаптацію параметрів роботи турбіни до поточних умов, що дозволяє підвищити ефективність використання енергії вітру та забезпечити стабільність функціонування установки.

Вітрова турбіна є «складним електромеханічним пристроєм (рисунки 1.4), що перетворює кінетичну енергію вітрового потоку на електричну енергію. Процес перетворення відбувається завдяки аеродинамічній взаємодії лопатей ротора з повітряним потоком, внаслідок якої виникає обертовий момент, що передається через трансмісійну систему до електрогенератора» [7].

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

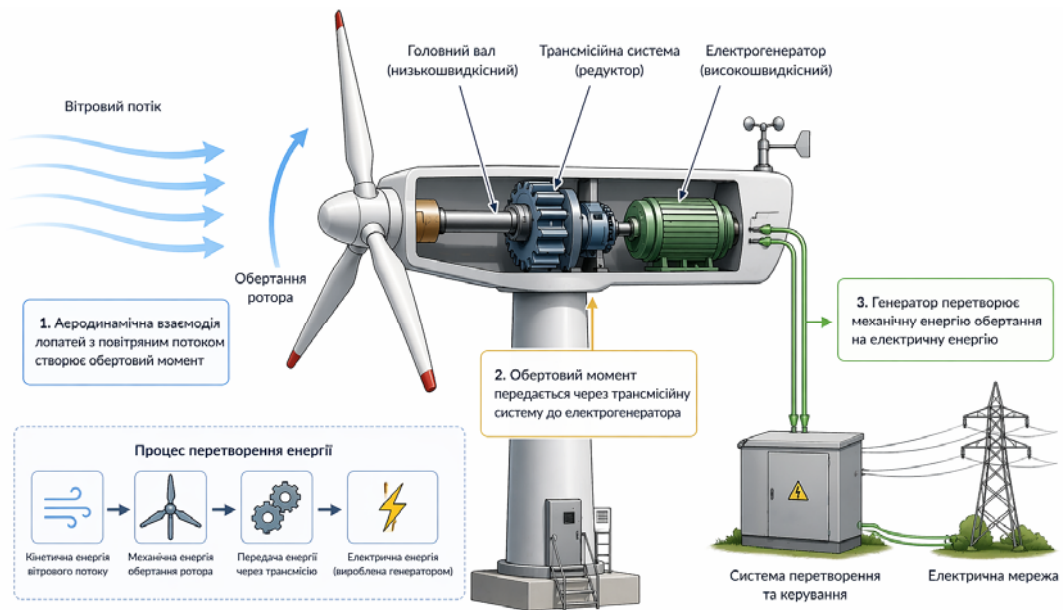


Рисунок 1.4-Принцип роботи вітрової турбіни

Ефективне функціонування сучасних вітроенергетичних установок потужністю від кількох сотень кіловат до десятків мегават неможливе без застосування розвинених систем автоматичного керування. Це обумовлено рядом принципових чинників:

- нестационарним та непередбачуваним характером вітрового ресурсу — швидкість і напрям вітру змінюються у широкому діапазоні як у часі, так і в просторі;
- необхідністю максимізації виробітку електроенергії при одночасному обмеженні механічних навантажень на конструктивні елементи установки;
- вимогами безпечної роботи в аварійних ситуаціях — надмірні пориви вітру, відмова обладнання або аварійне відключення мережі;
- необхідністю забезпечення якісних показників виробленої електроенергії відповідно до стандартів підключення до мережі.

Автоматизована система управління (АСУ) вітровою турбіною є ієрархічною інформаційно-керуючою системою, що здійснює безперервний збір даних від сенсорів, їх обробку та формування керуючих впливів на виконавчі механізми установки. Ефективна реалізація таких функцій вимагає

застосування як класичних методів теорії автоматичного регулювання, так і сучасних інтелектуальних алгоритмів оптимізації.

Підсистема орієнтування гондоли (рисунок 1.5) є важливим функціональним елементом автоматизованої системи керування вітровою турбіною, призначеним для забезпечення оптимального положення ротора відносно напрямку вітрового потоку. Основною метою її роботи є підтримання перпендикулярності площини обертання ротора до напрямку вітру, що безпосередньо впливає на ефективність перетворення енергії та рівень генерованої потужності.

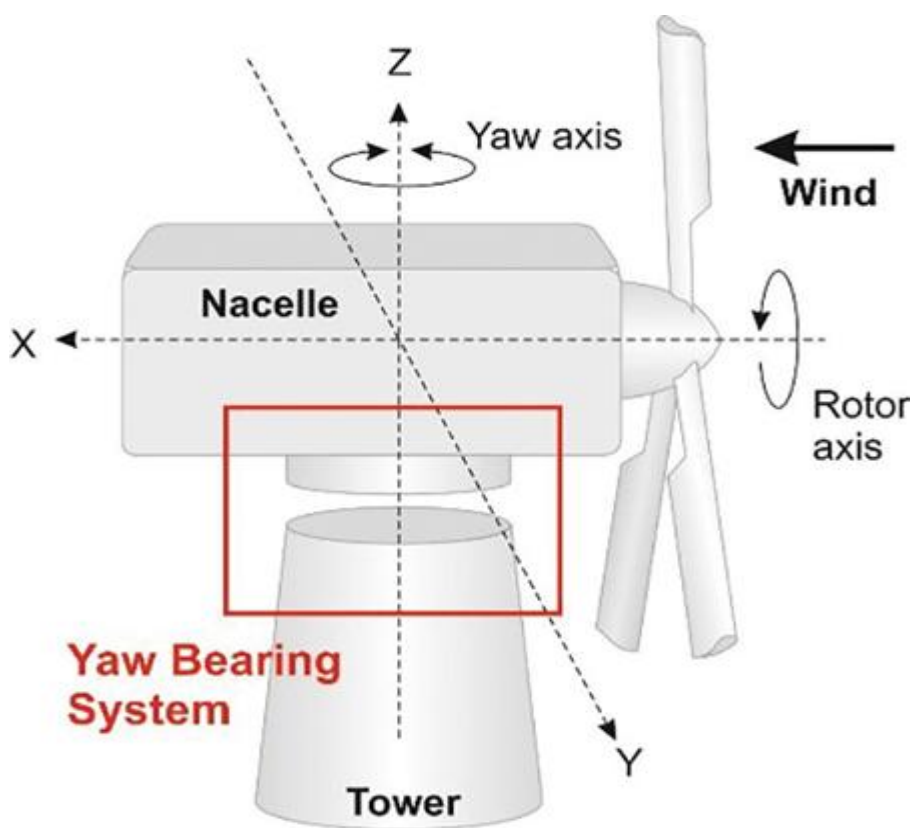


Рисунок 1.5- Підсистема орієнтування гондоли

Відхилення осі ротора від напрямку вітру, яке характеризується кутом розузгодження (yaw error), призводить до зменшення аеродинамічної ефективності установки. Згідно з теоретичними положеннями аеродинаміки, зокрема законом Беца, втрати потужності мають нелінійний характер і пропорційні кубу косинуса кута відхилення. Таким чином, навіть незначні похибки орієнтації можуть спричинити суттєве зниження енергетичної продуктивності вітрової турбіни.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Функціонування уав-системи базується на використанні сигналів від датчика напрямку вітру (флюгера), які піддаються попередній обробці з метою усунення впливу турбулентних коливань. Для цього застосовується інтегрування або усереднення сигналу в межах заданого часового інтервалу, що зазвичай становить від 30 до 120 секунд. Такий підхід дозволяє відокремити стійкі зміни напрямку вітру від короточасних флуктуацій, характерних для реальних атмосферних умов.

Рішення про необхідність повороту гондоли приймається лише у випадку перевищення заданого порогового значення кута розузгодження, яке, як правило, знаходиться в межах 5–15°. Керування приводами здійснюється за допомогою промислового контролера, який реалізує відповідні алгоритми з урахуванням обмежень по швидкості обертання, навантаженню та умовам безпеки.

Додатково сучасні системи орієнтації можуть використовувати адаптивні та інтелектуальні алгоритми керування, що враховують історію змін вітрового потоку, прогнозні дані та режими роботи турбіни. Це дозволяє підвищити ефективність роботи установки, зменшити механічні навантаження та оптимізувати споживання енергії власних потреб.

Таким чином, уав-система відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної та ефективної роботи вітрової турбіни, оскільки дозволяє максимально використовувати енергетичний потенціал вітру при одночасному забезпеченні надійності та довговічності обладнання.

Pitch-система є однією з базових функціональних підсистем вітрової турбіни, що забезпечує керування аеродинамічними характеристиками ротора та безпосередньо впливає на величину генерованої потужності. Основне її призначення полягає у зміні кута встановлення лопатей відносно повітряного потоку, що дозволяє регулювати підйомну силу та, відповідно, обертовий момент на валу турбіни.

Кожна лопать оснащується індивідуальним приводом, який може бути виконаний у вигляді гідравлічної або електромеханічної системи (рисунок

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6). Така конструктивна реалізація забезпечує можливість незалежного керування положенням кожної лопаті, що підвищує точність регулювання та адаптивність системи. Діапазон зміни кута зазвичай становить від 0° , що відповідає режиму максимального використання енергії вітру, до приблизно 90° , при якому лопать переходить у положення флюгування, мінімізуючи аеродинамічне навантаження.



Рисунок 1.6- Pitch-система

У режимах роботи при швидкостях вітру, менших за номінальні значення, система керування підтримує лопаті у положенні, що відповідає максимальному коефіцієнту використання енергії вітру. Це дозволяє забезпечити максимальний відбір доступного енергетичного ресурсу. Після досягнення номінальної швидкості повітряного потоку алгоритм керування змінює кут нахилу лопатей, поступово зменшуючи аеродинамічний коефіцієнт з метою обмеження потужності на заданому рівні та запобігання перевантаженню генератора.

У випадку перевищення гранично допустимих швидкостей вітру, які зазвичай становлять близько 25 м/с, система переводить лопаті у режим флюгування. У цьому положенні площа лопатей орієнтується таким чином, щоб максимально зменшити взаємодію з повітряним потоком, що

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

забезпечує ефективний захист конструктивних елементів турбіни від надмірних механічних навантажень.

Таким чином, pitch-система виконує не лише функцію оптимізації енергетичних показників, але й відіграє ключову роль у забезпеченні надійності та безпеки експлуатації вітрової турбіни, особливо в умовах змінного та турбулентного вітрового режиму.

Підсистема управління генератором (рисунок 1.7) у складі вітрової електростанції виконує критично важливу роль у забезпеченні ефективного та стабільного перетворення механічної енергії вітрового потоку в електричну енергію, придатну для передачі в енергосистему. Її функціонування базується на комплексній взаємодії алгоритмів регулювання, силової електроніки та систем вимірювання, що дозволяє адаптувати режим роботи генератора до змінних умов навколишнього середовища, передусім швидкості вітру.

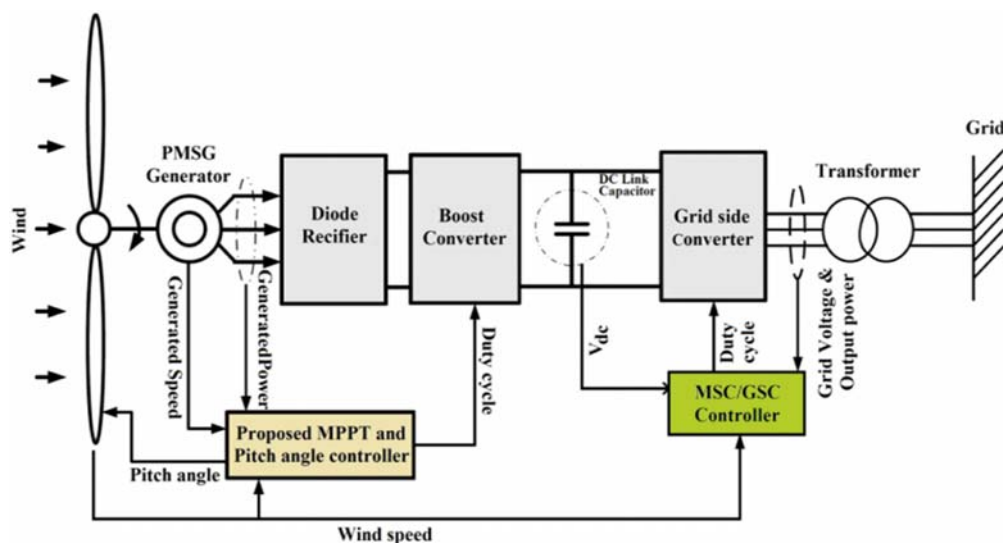


Рисунок 1.7- Підсистема управління генератором

Ключовим завданням підсистеми є формування такого режиму роботи генератора, за якого забезпечується максимальне використання доступного енергетичного потенціалу повітряного потоку. Це досягається шляхом динамічного регулювання електромагнітного моменту та швидкості обертання ротора, що реалізується на основі сучасних алгоритмів оптимізації, зокрема відстеження точки максимальної потужності. У процесі

роботи система постійно аналізує входні параметри, такі як швидкість вітру, частота обертання та електричні характеристики, і відповідно коригує керуючі впливи.

Оскільки параметри електроенергії, що генерується вітротурбіною, мають змінний характер, особливого значення набуває контур контролю частоти та потужності. Його функціонування спрямоване на забезпечення відповідності генерованої електроенергії стандартам енергомережі. У цьому контексті реалізується стабілізація частоти, обмеження активної потужності на номінальному рівні та підтримання необхідного балансу між генерацією і споживанням. Додатково система виконує захисні функції, зокрема реагує на перевищення допустимих значень напруги, струму або частоти, що підвищує надійність роботи всієї установки.

Невід'ємною складовою підсистеми є перетворювач частоти, який забезпечує електромагнітну сумісність генератора з енергосистемою. Його робота ґрунтується на багатоступеневому перетворенні електричної енергії: спочатку змінна напруга зі змінною частотою, що генерується, перетворюється у постійну, після чого знову формується змінна напруга з фіксованими параметрами. Такий підхід дозволяє незалежно регулювати швидкість обертання генератора та параметри електроенергії на виході. Використання сучасних напівпровідникових елементів і методів широтно-імпульсної модуляції забезпечує високу точність керування, зменшення втрат та підвищення якості електроенергії.

Гальмівна система вітрової електростанції (рисунок 1.8) є невід'ємною складовою комплексу безпеки та керування, призначеною для забезпечення контрольованого уповільнення або повної зупинки ротора за нормальних і аварійних режимів експлуатації. Її функціонування спрямоване на запобігання пошкодженням обладнання, перевантаженням конструктивних елементів та виникненню небезпечних ситуацій, що можуть бути спричинені надмірною швидкістю обертання або відмовами окремих підсистем[8].

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

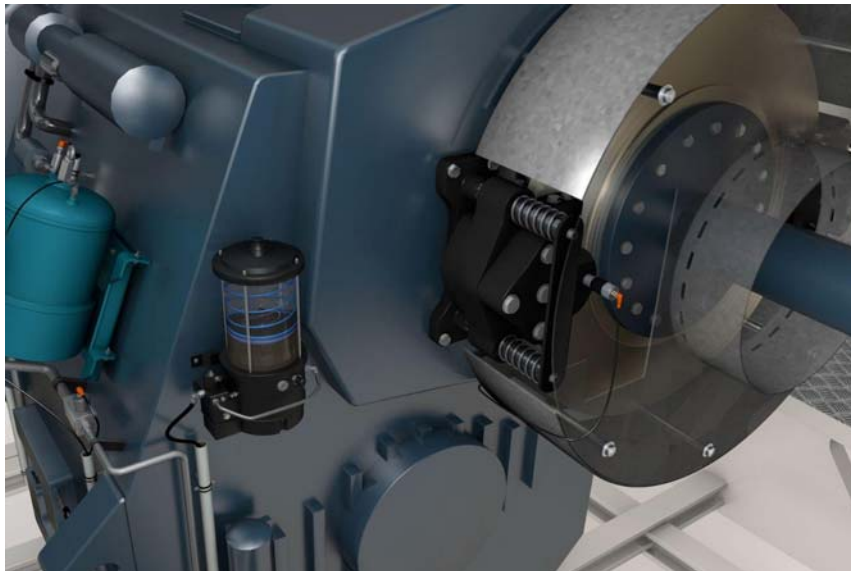


Рисунок 1.8- Гальмівна система вітрової електростанції

Основною функцією гальмівної підсистеми є реалізація аварійної зупинки ротора у випадках, коли параметри роботи виходять за допустимі межі, зокрема при перевищенні граничної швидкості вітру, втраті зв'язку з мережею, несправностях генератора чи системи керування. У таких умовах система повинна забезпечити максимально швидке, але водночас безпечне зниження швидкості обертання, уникаючи різких механічних навантажень, що можуть призвести до руйнування вузлів турбіни. Для цього застосовуються багаторівневі алгоритми захисту, які ініціюють послідовність дій залежно від характеру аварійної ситуації [9].

Підсистема теплового менеджменту вітрової електростанції виконує важливу функцію забезпечення стабільного теплового режиму роботи електротехнічного та електронного обладнання, що безпосередньо впливає на ефективність, надійність і довговічність всієї установки. У процесі експлуатації генератор, силові перетворювачі, трансформатори та інші компоненти виділяють значну кількість тепла, яке за відсутності ефективного відведення може призвести до перегріву, деградації ізоляційних матеріалів та виходу обладнання з ладу.

Основним завданням підсистеми є підтримання температурних параметрів у допустимих межах шляхом організації керованого теплообміну між внутрішнім середовищем гондoli та навколишнім повітрям. Для цього

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

застосовуються комбіновані методи охолодження, що включають як пасивні, так і активні засоби. Пасивне охолодження базується на природній конвекції та теплопровідності конструкційних матеріалів, тоді як активне реалізується за допомогою спеціалізованих пристроїв, зокрема вентиляторів і керованих клапанів (рисунок 19).

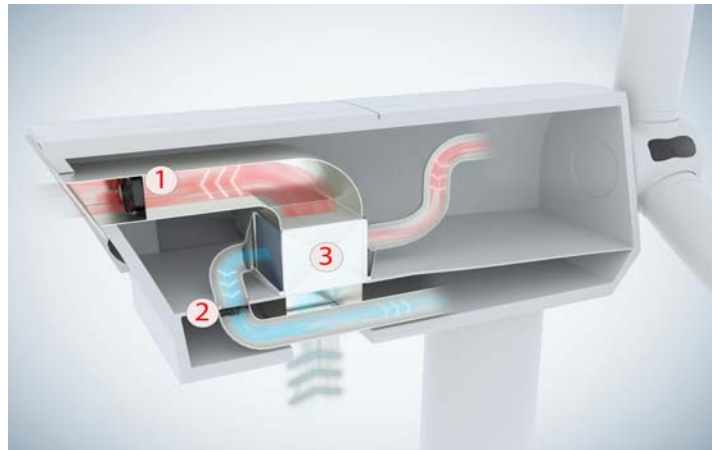


Рисунок 1.9 - Циркуляцію повітря всередині гондоли

Вентилятори забезпечують примусову циркуляцію повітря всередині гондоли, що дозволяє ефективно відводити тепло від найбільш нагрітих елементів, таких як силові модулі перетворювачів та обмотки генератора. Їх робота, як правило, регулюється автоматично залежно від показів температурних датчиків, що дає змогу оптимізувати енергоспоживання та зменшити знос обладнання. Клапани, у свою чергу, виконують функцію керування повітряними потоками, забезпечуючи надходження холоднішого зовнішнього повітря або обмеження доступу при несприятливих погодних умовах, наприклад, під час високої вологості чи запиленості.

Підсистема моніторингу та діагностики вітрової електростанції призначена для безперервного контролю технічного стану основних вузлів і агрегатів, а також своєчасного виявлення відхилень у їх роботі. Вона є ключовим елементом забезпечення надійності та безпеки експлуатації, оскільки дозволяє не лише фіксувати поточні параметри функціонування, але й прогнозувати можливі відмови на ранніх стадіях їх виникнення. Функціонування підсистеми базується на зборі та обробці великої кількості

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

даних, що надходять від численних датчиків, встановлених у критичних точках установки. До таких параметрів належать температура, вібрації, струм, напруга, швидкість обертання, тиск та інші характеристики, що відображають стан генератора, редуктора, підшипників, силової електроніки та механічних елементів. Отримані дані аналізуються у реальному часі за допомогою алгоритмів, які дозволяють визначати як явні несправності, так і приховані тенденції до їх розвитку.

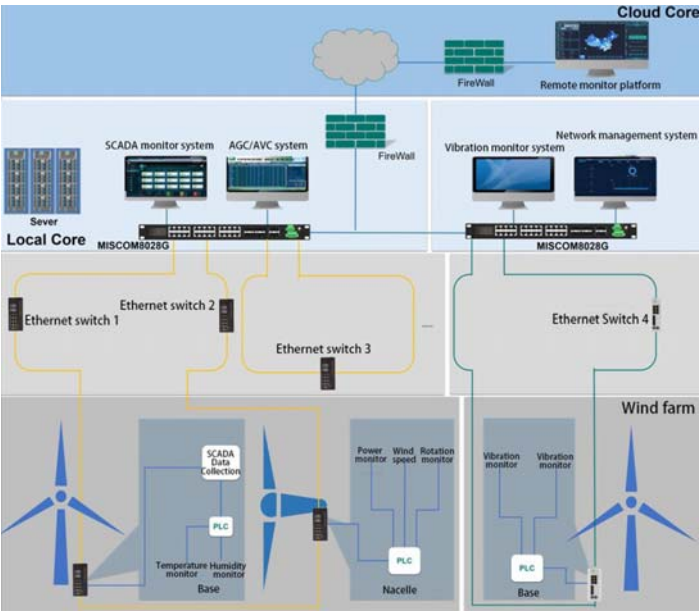


Рисунок 1.10- Підсистема моніторингу та діагностики вітрової електростанції

Виявлення несправностей здійснюється шляхом порівняння поточних значень параметрів із заданими допустимими межами та еталонними моделями роботи. У разі виявлення аномалій система формує відповідні діагностичні сигнали, які можуть свідчити про перегрів, дисбаланс, знос підшипників, електричні перевантаження або інші порушення нормального режиму. Сучасні системи діагностики часто використовують методи спектрального аналізу вібрацій, статистичні підходи та елементи машинного навчання для підвищення точності виявлення дефектів.

Невід’ємною складовою підсистеми є засоби сигналізації та блокування, які забезпечують оперативну реакцію на виявлені відхилення. Сигналізація реалізується у вигляді візуальних та цифрових повідомлень, що

передаються оператору або у диспетчерський центр, дозволяючи швидко оцінити стан системи та прийняти відповідні рішення. У критичних ситуаціях активуються механізми блокування, які можуть включати обмеження потужності, зупинку окремих вузлів або повне аварійне відключення турбіни. Такий підхід мінімізує ризик розвитку аварій та зменшує можливі пошкодження обладнання.

Узагальнюючи розглянуті підсистеми вітрової електростанції, можна зазначити, що їх комплексне функціонування забезпечує ефективну, надійну та безпечну роботу всієї енергетичної установки. Підсистема управління генератором відповідає за оптимальне перетворення енергії та узгодження параметрів електроенергії з мережею, гальмівна система гарантує безпечну зупинку ротора в штатних і аварійних режимах, а підсистема теплового менеджменту підтримує допустимі температурні умови роботи обладнання. Водночас система моніторингу та діагностики забезпечує постійний контроль технічного стану, своєчасне виявлення несправностей і реалізацію захисних дій через сигналізацію та блокування. Таким чином, інтеграція цих підсистем формує єдину інтелектуальну структуру керування, що підвищує ефективність, довговічність та експлуатаційну надійність вітрової електростанції.

1.3 Дослідження типів вітрових турбін

Вітрова турбіна «являє собою складний електромеханічний комплекс, призначений для перетворення кінетичної енергії повітряного потоку у корисну електричну енергію. Принцип її роботи ґрунтується на поетапному перетворенні енергії: під дією вітру аеродинамічні сили, що виникають на лопатях ротора, формують обертовий момент, який передається на вал, а далі — на генератор, де механічна енергія трансформується в електричну. Ефективність цього процесу визначається як аеродинамічними

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостями ротора, так і якістю систем керування, що забезпечують оптимальні режими роботи в умовах змінної швидкості вітру» [8].

Еволюція конструкцій вітрових турбін відбувалася протягом тривалого часу та була зумовлена розвитком матеріалознавства, силової електроніки й методів автоматичного керування. Сучасні установки характеризуються високим ступенем інженерної оптимізації та представлені різноманітними типами, які відрізняються геометрією ротора, способом передачі енергії, принципами регулювання та сферою застосування. Кожне конструктивне рішення має свої переваги та обмеження, що проявляються у вигляді різних аеродинамічних коефіцієнтів корисної дії, механічної надійності, вартості виготовлення та експлуатаційних витрат.

Базова «класифікація вітрових турбін здійснюється за орієнтацією осі обертання ротора відносно напрямку повітряного потоку. Відповідно до цього критерію виділяють два основні класи: горизонтально-осьові вітрові турбіни (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) та вертикально-осьові вітрові турбіни (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)» [10].

Горизонтально-осьові турбіни (рисунки 1.11) є найбільш поширеними у промисловій енергетиці, оскільки забезпечують високий коефіцієнт використання енергії вітру та ефективну роботу при значних потужностях. Вони, як правило, оснащуються системами орієнтації на вітер (yaw-системами) та механізмами регулювання кута лопатей, що дозволяє адаптуватися до змінних умов експлуатації.



Рисунок 1.11- Горизонтально-осьові турбіни

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Навітряна (Upwind) (рисунок 1.12а) конфігурація вітрової турбіни характеризується таким компонуванням, за якого ротор розміщується з боку набігаючого повітряного потоку перед опорною вежею. Це означає, що лопаті першими взаємодіють із вітром, тоді як башта знаходиться у «тіні» потоку, що дозволяє мінімізувати вплив турбулентності на аеродинаміку ротора. Подібна схема є домінуючою у сучасній вітроенергетиці та застосовується переважною більшістю промислових установок, частка яких сягає близько 95–97% від загальної встановленої потужності.

Ключовою перевагою навітряної конфігурації є більш рівномірний та «чистий» обтікальний потік, який забезпечує стабільні аеродинамічні характеристики лопатей і, як наслідок, підвищений коефіцієнт використання енергії вітру. Для таких турбін типовим є досягнення коефіцієнта потужності $C_{p,Cr}$ на рівні 0,48–0,50, що наближається до теоретичної межі Беца. Висока ефективність зумовлює широке застосування цієї конфігурації у великих наземних та офшорних вітрових електростанціях.

Разом із тим, навітряна схема потребує обов'язкового використання системи орієнтації (yaw-системи), яка забезпечує поворот гондоли таким чином, щоб площа обертання ротора залишалася перпендикулярною до напрямку вітру. Ця система функціонує на основі даних від анемометрів і флюгерів, а також алгоритмів керування, що забезпечують точне та своєчасне позиціонування турбіни. Наявність yaw-механізму ускладнює конструкцію та збільшує вартість установки, проте ці витрати компенсуються підвищеною енергетичною ефективністю.

Підвітряна (Downwind) (рисунок 1.12б) конфігурація вітрової турбіни характеризується розташуванням ротора позаду опорної вежі відносно напрямку повітряного потоку. У такій схемі вітер спочатку взаємодіє з баштою, а вже потім — з лопатями, що формує специфічні аеродинамічні умови роботи ротора. Однією з ключових особливостей цієї конфігурації є здатність до пасивного самонаведення на вітер: ротор природним чином вирівнюється за напрямком потоку, що дозволяє відмовитися від складної та

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергозатратної системи орієнтації (yaw-механізму). Це спрощує конструкцію, знижує масу гондоли та потенційно зменшує експлуатаційні витрати.

Разом із тим, підвітряне розташування ротора супроводжується низкою суттєвих недоліків. Основним із них є вплив так званого «тіньового ефекту» башти: при обертанні лопаті періодично проходять через зону збуреного повітряного потоку, що виникає за вежею. Це призводить до циклічних змін аеродинамічних сил, виникнення змінних навантажень і додаткових вібрацій. У довгостроковій перспективі такі явища можуть спричиняти прискорений знос матеріалів, підвищення рівня шуму та зниження загальної надійності конструкції.



а)

б)

Рисунок 1.12 Навітряна (Upwind) Підвітряна (Downwind) вітрової турбіни

Багатолопатева конфігурація вітрової турбіни (рисунок 1.13) характеризується використанням ротора з великою кількістю лопатей, зазвичай у діапазоні від 12 до 24, рівномірно розташованих по колу. Така конструкція історично сформувалася для виконання механічних робіт, насамперед водопідйому, і широко застосовується у так званих вітряках-помпах, що використовуються в сільському господарстві та автономних системах водопостачання.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



Рисунок 1.13- Багатолопатева конфігурація вітрової турбіни

Аеродинамічні властивості багатолопатевих турбін суттєво відрізняються від сучасних швидкохідних установок. Значна кількість лопатей створює високий опір повітряному потоку, що призводить до формування великого пускового та робочого крутного моменту навіть при невисоких швидкостях вітру. Водночас такі турбіни працюють при малих значеннях коефіцієнта швидкохідності λ , який зазвичай знаходиться у межах 1–2, що відповідає низькій частоті обертання ротора. Це робить їх придатними для безпосереднього приводу механічних навантажень без необхідності складних передавальних механізмів [11].

Разом із тим, енергетична ефективність багатолопатевих конструкцій є обмеженою. Коефіцієнт використання енергії вітру $C_p C_{pr} C_p$ зазвичай не перевищує 0,15–0,30, що значно нижче порівняно з сучасними трилопатевими горизонтально-осьовими турбінами. Основною причиною цього є домінування сил аеродинамічного опору над підйомною силою, а також значні втрати енергії через взаємодію потоків між численними лопатями.

Вертикально-осьові турбіни, (рисунок 1.12) у свою чергу, характеризуються простішою конструкцією та відсутністю необхідності орієнтації відносно напрямку вітру. Вони можуть працювати при турбулентних потоках і є перспективними для застосування в умовах щільної

міської забудови або на обмежених територіях. Проте їх коефіцієнт корисної дії зазвичай нижчий порівняно з горизонтально-осьовими аналогами, що обмежує їх використання у великій енергетиці.



а- Дар'є,

б- Савоніуса

Рисунок 1.12- Вертикально-осьові турбіни

Класична турбіна Дар'є (рисунок 1.12.а) реалізує підйомний (lift-based) принцип дії, за якого аеродинамічні сили, що виникають на профільованих лопатях, формують обертовий момент. Характерною особливістю цієї конструкції є використання тропоскеїнної форми лопатей, яка описується залежністю:

$$r(z) = R \cdot \cos\left(\frac{z}{L} \cdot \frac{\pi}{2}\right),$$

де R — максимальний радіус ротора, а L — половина висоти лопаті. Така геометрія дозволяє мінімізувати згинальні напруження під час обертання, забезпечуючи більш рівномірний розподіл механічних навантажень [11].

Альтернативним підходом є ротор Савоніуса (рисунок 1.12б), він працює за принципом різниці аеродинамічного опору (drag-based), що виникає між увігнутою та опуклою поверхнями лопатей. Значення коефіцієнтів опору для цих поверхонь суттєво відрізняються, що створює крутний момент навіть при низьких швидкостях вітру. Для таких турбін характерні низькі значення коефіцієнта швидкохідності ($\lambda \approx 0,7-1,5$) та відносно невисокий коефіцієнт потужності ($C_p \approx 0,12-0,25$).

Разом із тим, вони відрізняються високою надійністю, простотою

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виготовлення та здатністю до самозапуску, що робить їх придатними для автономних і малопотужних систем [12].

Окрему групу становлять офшорні вітрові турбіни (рисунок 1.13), які встановлюються у прибережних акваторіях та відкритому морі. Вони відзначаються значно більшими габаритами, підвищеними вимогами до надійності та спеціалізованими конструктивними рішеннями, що враховують вплив агресивного середовища. Крім того, активно розвиваються інноваційні концепції вітрових установок, зокрема безредукторні генераторні системи, багатороторні конфігурації та адаптивні аеродинамічні структури, що спрямовані на підвищення ефективності та зниження вартості виробництва електроенергії.

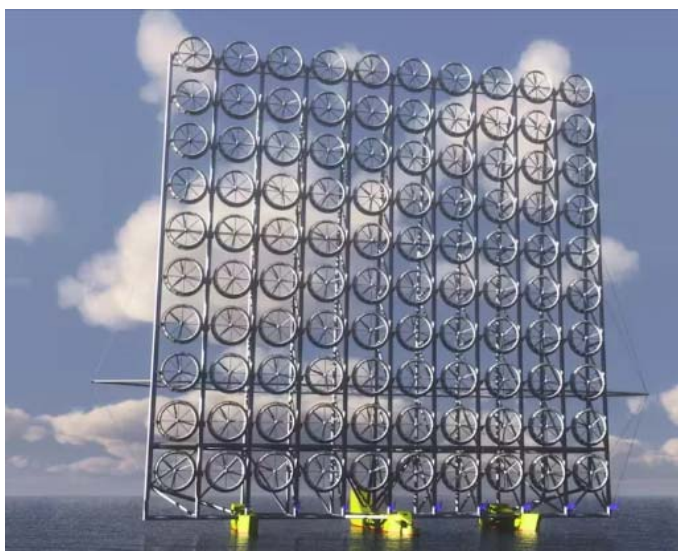


Рисунок 1.13- Офшорні вітрові турбіни

У роботі розраховано параметри вітрових турбін що представлено на рисунку 1.14. Аналіз даних свідчить про наявність трьох характерних ділянок роботи вітрових турбін. У діапазоні малих швидкостей вітру (приблизно до 4–5 м/с) потужність практично дорівнює нулю, що відповідає режиму нижче швидкості запуску (cut-in), коли енергії потоку недостатньо для подолання інерційних і механічних втрат системи. У подальшому, в інтервалі приблизно від 5 до 12–13 м/с, спостерігається інтенсивне зростання потужності, яке має нелінійний характер і наближено відповідає кубічній залежності від

швидкості вітру. Саме на цій ділянці реалізується режим максимального відбору енергії.

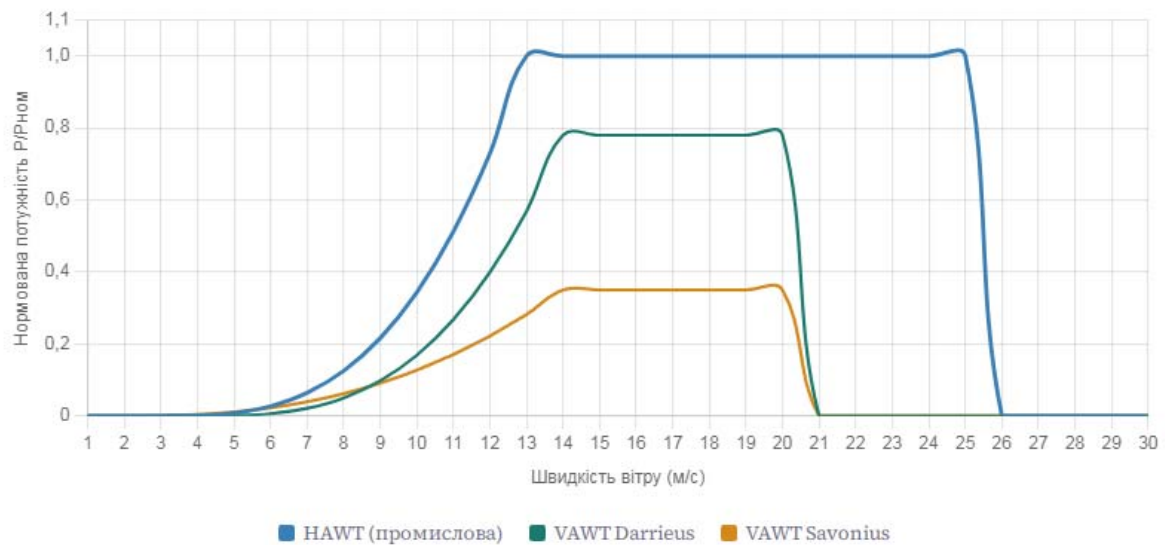


Рисунок 1.14- параметри вітрових турбін що представлено

Після досягнення номінальної швидкості вітру (близько 12–14 м/с) потужність виходить на плато, що відповідає режиму обмеження на рівні номінальної потужності. У цьому діапазоні система керування турбіни (зокрема pitch-регулювання) забезпечує стабілізацію вихідної потужності, запобігаючи перевантаженню генератора. Видно, що для різних кривих рівень цього плато відрізняється, що може відповідати різним типам турбін, коефіцієнтам корисної дії або стратегіям керування [13].

При подальшому зростанні швидкості вітру (приблизно понад 20–25 м/с) спостерігається різке зниження потужності до нуля, що відповідає режиму аварійного відключення (cut-out). У цьому випадку турбіна зупиняється для запобігання механічним пошкодженням через надмірні аеродинамічні та інерційні навантаження.

Порівняння трьох представлених кривих дозволяє зробити висновок про ефективність HAWT енергетичного перетворення: верхня крива демонструє найвищий рівень нормованої потужності та ширший діапазон стабільної роботи, тоді як нижні характеризуються меншим коефіцієнтом використання енергії вітру. Таким чином, графік відображає узагальнені

енергетичні характеристики вітрових турбін та ілюструє вплив конструктивних і керуючих параметрів на їх продуктивність.

На основі проведено дослідження на графіку рисунку 1.15 відображено розподіл застосування різних типів вітрових турбін залежно від встановленої потужності вітрових електростанцій. Графік виконано у вигляді стовпчикової діаграми зі складеними частками, де по осі абсцис наведено класи потужності (мікро, мала, середня, велика та офшорна генерація), а по осі ординат - частку застосування відповідних технологій у відсотках.

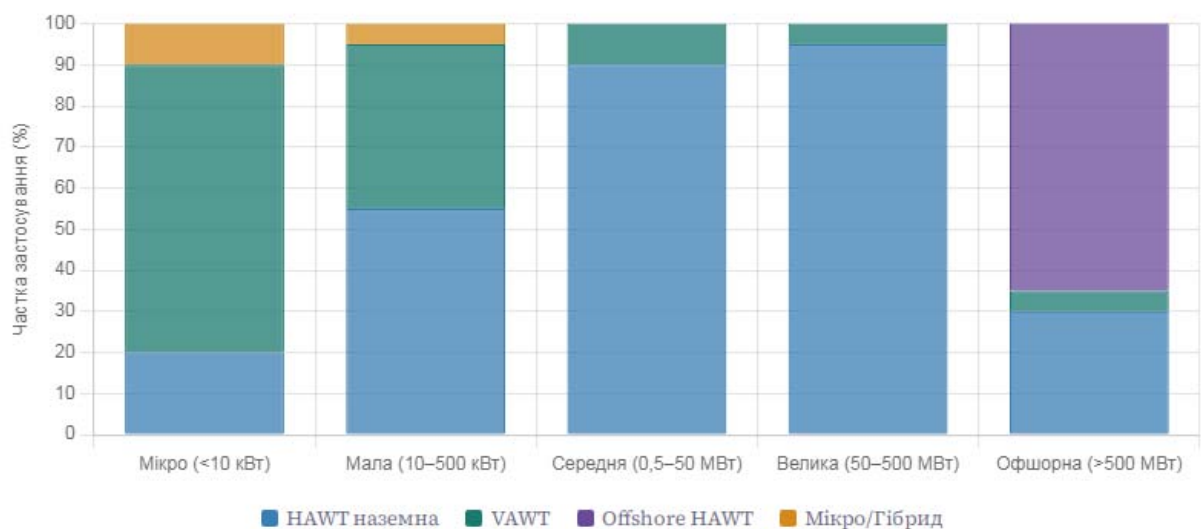


Рисунок 1.16- Застосування різних типів вітрових турбін залежно від встановленої потужності вітрових електростанцій

Аналіз діаграми свідчить про чітку залежність між масштабом енергетичної установки та вибором типу турбіни. У сегменті мікропотужностей (до 10 кВт) домінують вертикально-осьові турбіни (VAWT), частка яких є найбільшою серед усіх типів, що пояснюється їх здатністю працювати в умовах турбулентного потоку та відсутністю необхідності в системах орієнтації. Горизонтально-осьові турбіни наземного типу (HAWT) у цьому сегменті займають меншу частку, тоді як гібридні рішення та інші конфігурації відіграють другорядну роль.

У діапазоні малих потужностей (10–500 кВт) спостерігається зміщення балансу на користь горизонтально-осьових турбін, частка яких перевищує половину, хоча вертикально-осьові конструкції ще зберігають значну

присутність. Це свідчить про поступове зростання вимог до ефективності перетворення енергії та продуктивності установок.

Для середніх (0,5–50 МВт) і великих (50–500 МВт) потужностей практично повністю домінують горизонтально-осьові турбіни наземного виконання. Їх частка наближається до 90-100%, що обумовлено високим коефіцієнтом використання енергії вітру, кращою масштабованістю та відпрацьованістю технології. Вертикально-осьові турбіни у цих сегментах майже не застосовуються через нижчу ефективність та обмеження щодо збільшення потужності.

В офшорному сегменті (понад 500 МВт) переважають спеціалізовані горизонтально-осьові турбіни морського виконання (offshore HAWT), частка яких є визначальною. Це пояснюється необхідністю забезпечення максимальної потужності, надійності та ефективності в умовах морського середовища. Інші типи турбін у цьому класі практично не використовуються або мають експериментальний характер.

Таким чином, наведена діаграма ілюструє закономірну тенденцію: із зростанням встановленої потужності вітрових електростанцій відбувається перехід від різноманітних і менш ефективних конструкцій до домінування високоефективних горизонтально-осьових турбін, що забезпечують оптимальні техніко-економічні показники у великомасштабній генерації електроенергії.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ТЕХНІЧНІ КОМПОНЕНТИ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Дослідження типів генераторів вітрових турбін

Вибір типу електричного генератора є одним із ключових конструктивних рішень при проектуванні вітрової турбіни, оскільки він безпосередньо визначає ефективність перетворення механічної енергії на електричну, вимоги до системи управління, надійність та вартість усієї установки. Для дослідження основних характеристик генераторів вітрових турбін нам необхідно в першу чергу дослідити фізичні процеси, що на них впливають.

Потужність, що міститься у вітровому потоці, визначається виразом[12]:

$$P_{\text{вітер}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (2.1)$$

де ρ - густина повітря (кг/м³, стандартне значення 1,225 кг/м³); $A = \pi \cdot R^2$ - площа ометання ротора (м²); v - швидкість вітру (м/с).

Реально вилучена потужність визначається через безрозмірний коефіцієнт потужності C_p [13]:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (2.2)$$

де $C_p \leq 0,593$ - коефіцієнт потужності (теоретична межа Беца). Максимально досягнутий на практиці C_{p_max} складає 0,45–0,50 залежно від типу конструкції ротора та генератора.

Коефіцієнт швидкохідності λ (Tip Speed Ratio) є ключовим параметром, що визначає робочу точку вітрової турбіни[13]:

$$\lambda = \omega \cdot R / v, \quad (2.3)$$

де ω - кутова швидкість ротора (рад/с); R - радіус ротора (м); v - швидкість вітру (м/с).

Кожен тип генератора має своє оптимальне значення λ_{opt} , при якому C_p досягає максимуму. Для PMSG $\lambda_{opt} = 8-9$, для DFIG - 7–8, для SG - 6–7, для SCIG - 5–6.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для економічного порівняння типів генераторів використовується показник нормованої вартості електроенергії (Levelized Cost of Energy):

$$LCOE = (CAPEX + \sum OPEX_t / (1+r)^t) / \sum AEP_t / (1+r)^t, \quad (2.4)$$

де $CAPEX$ — капітальні витрати (€); $OPEX_t$ — операційні витрати у рік t (€/рік); AEP_t — річне виробництво електроенергії (МВт·год); r — ставка дисконтування (зазвичай 7–10%).

Річне виробництво електроенергії розраховується з використанням коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП, Capacity Factor - CF):

$$AEP = P_{ном} \cdot 8760 \cdot CF,$$

де $P_{ном}$ — встановлена потужність (МВт); 8760 - кількість годин у році; CF — коефіцієнт використання потужності (0,30–0,50 для берегових станцій).

Короткозамкнений асинхронний генератор (SCIG)(рисунок 2.1) належить до найпростіших за конструктивним виконанням електромеханічних перетворювачів, що застосовуються у складі вітроенергетичних установок. Його ротор сформовано за типом так званої «білячої клітки», яка складається з замкнених провідників, виготовлених переважно з алюмінію або міді. У типовій конфігурації такий генератор підключається безпосередньо до електричної мережі або через повнопотужний перетворювач частоти. Внаслідок наявності ковзання швидкість обертання ротора лише незначною мірою відхиляється від синхронної, що зумовлює практично фіксований режим роботи турбіни та обмежує можливості регулювання частоти [14].

Характерною особливістю SCIG є споживання реактивної потужності з мережі, у зв'язку з чим виникає необхідність у застосуванні додаткових засобів компенсації, таких як батареї конденсаторів або статичні компенсатори реактивної потужності. До ключових переваг даного типу генератора належать конструктивна простота, висока експлуатаційна надійність, а також відносно низькі капітальні та сервісні витрати. Водночас

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєвими обмеженнями є відсутність гнучкого керування швидкістю обертання та реактивною потужністю, що звужує доцільність його використання у сучасних високопотужних вітроенергетичних комплексах.

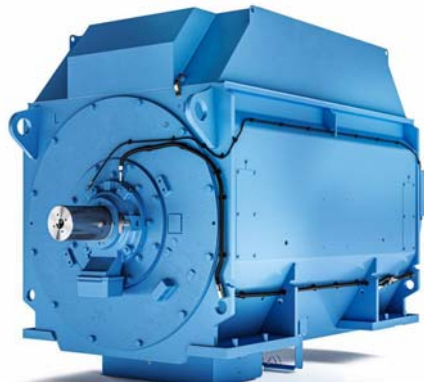


Рисунок 2.1- Короткозамкнений асинхронний генератор (SCIG)

Асинхронний генератор з подвійним живленням (DFIG) (рисунок 2.2) є одним із ключових технічних рішень, що домінують у сегменті сучасних вітроенергетичних установок середнього класу потужності (приблизно 1,5–5 МВт). Його принципова відмінність полягає у комбінованій схемі підключення: обмотка статора безпосередньо інтегрується в електричну мережу, тоді як ротор підключається через силовий перетворювач частоти з двонаправленим обміном енергії. Така архітектура забезпечує можливість незалежного керування активною та реактивною потужностями генератора[15].



Рисунок 2.2- Асинхронний генератор з подвійним живленням (DFIG)

Суттєвою перевагою DFIG є те, що перетворювач обробляє лише частину повної потужності (зазвичай у межах 25–35%), що дозволяє істотно

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

зменшити його габарити, вартість і втрати порівняно з системами повного перетворення енергії. Завдяки цьому досягається економічно ефективний компроміс між функціональністю та вартістю. Наявність керованого ротора дає змогу реалізувати змінношвидкісний режим роботи з відхиленням швидкості обертання приблизно $\pm 30\%$ від синхронної, що є критично важливим для впровадження алгоритмів максимального відбору енергії вітру (MPPT) та підвищення загального коефіцієнта використання енергії потоку.

З точки зору електромережевої взаємодії, DFIG характеризується здатністю до гнучкого регулювання реактивної потужності, підтримки напруги в точці приєднання та забезпечення стійкості при короткочасних провалах напруги (режими типу Low Voltage Ride-Through, LVRT). Це робить його придатним для інтеграції у сучасні енергосистеми з підвищеними вимогами до якості електроенергії та стабільності режимів.

Водночас конструктивні особливості DFIG обумовлюють і певні експлуатаційні обмеження. Зокрема, використання контактних кілець і щіткового вузла для підключення ротора знижує надійність та потребує регулярного технічного обслуговування. Крім того, у більшості реалізацій застосовується редукторний механізм для узгодження швидкостей вітроколеса і генератора, що також ускладнює конструкцію та підвищує витрати на експлуатацію. Незважаючи на це, завдяки оптимальному поєднанню вартості, керованості та енергоефективності, DFIG тривалий час залишається одним із найбільш збалансованих і поширених рішень у вітроенергетиці[16].

Синхронний генератор з електромагнітним збудженням (SG)(рисунок 2.3) є високоефективним типом електромашини, який широко застосовується у сучасних вітроенергетичних установках, зокрема у системах із змінною швидкістю обертання. Його принцип роботи базується на формуванні магнітного поля ротора за рахунок подачі струму збудження в обмотку, що дозволяє гнучко керувати електромагнітними процесами в машині. На відміну від асинхронних генераторів, у SG швидкість обертання жорстко

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пов'язана з частотою електричної мережі, однак у вітроенергетиці ця залежність компенсується застосуванням силових перетворювачів.



Рисунок 2.3- Синхронний генератор з електромагнітним збудженням (SG)

У типовій конфігурації синхронний генератор підключається до мережі через повнопотужний перетворювач частоти за схемою АС–DC–АС. Такий підхід забезпечує повну електричну ізоляцію генератора від мережі, що дозволяє незалежно регулювати частоту, напругу та інші параметри виробленої електроенергії. Це особливо важливо для інтеграції в енергосистеми з високими вимогами до якості електроенергії, а також для реалізації складних алгоритмів керування, включаючи MPPT, стабілізацію напруги та обмеження потужності при змінних вітрових умовах.

Збудження ротора може здійснюватися як через контактні кільця та щітковий вузол, так і за допомогою безконтактних систем (збуджувачів), що підвищує надійність і знижує потребу в технічному обслуговуванні. Важливою перевагою SG є можливість застосування у безредукторних (direct-drive) конфігураціях, де вал ротора генератора безпосередньо з'єднаний із вітроколесом. Така архітектура усуває необхідність у редукторі, який є одним із найбільш навантажених і зношуваних елементів системи, тим самим підвищуючи загальну надійність установки та зменшуючи експлуатаційні витрати.

Разом з тим, реалізація direct-drive систем на базі синхронних генераторів з електромагнітним збудженням супроводжується збільшенням

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

габаритів і маси машини. Це обумовлено необхідністю формування значного магнітного потоку при відносно низьких швидкостях обертання, що досягається за рахунок збільшення кількості полюсів і діаметра ротора. Додатковим аспектом є наявність системи живлення обмотки збудження, що ускладнює конструкцію та може знижувати загальний ККД у порівнянні з генераторами на постійних магнітах.

Попри зазначені обмеження, синхронні генератори з електромагнітним збудженням залишаються перспективним рішенням завдяки можливості точного керування енергетичними параметрами, високій адаптивності до різних режимів роботи та сумісності з сучасними силовими електронними системами перетворення енергії.

Синхронний генератор[16] з постійними магнітами (PMSG)(рисунок 2.4) належить до найперспективніших рішень, що активно впроваджуються у сучасних вітроенергетичних установках великої потужності, особливо в офшорних проєктах та новітніх наземних турбінах діапазону 3–15 МВт і вище. Його ключова особливість полягає у використанні постійних магнітів на роторі, що дозволяє відмовитися від традиційної обмотки збудження та відповідних допоміжних систем живлення. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню енергоефективності за рахунок зменшення електричних втрат, а також істотно скорочує витрати на технічне обслуговування завдяки відсутності щітково-кільцевих вузлів.



Рисунок 2.4- Синхронний генератор з постійними магнітами (PMSG)

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Електричне приєднання [17] PMSG до енергосистеми реалізується через повнопотужний перетворювач частоти за схемою AC–DC–AC, що забезпечує повну електричну розв'язку генератора від мережі. Така архітектура дозволяє незалежно регулювати частоту, напругу та активну і реактивну складові потужності, забезпечуючи високу якість електроенергії та ефективну інтеграцію в енергосистеми з нестабільними умовами роботи. Крім того, це відкриває можливості для реалізації складних алгоритмів керування, зокрема оптимізації відбору енергії вітру (MPPT), обмеження пікових навантажень і підвищення стійкості до мережових збурень.

Конструктивно PMSG може використовуватися як у традиційних схемах із редуктором, так і в безредукторних (direct-drive) конфігураціях. Останні набули особливого поширення у великогабаритних турбінах, де низькошвидкісний багатополісний генератор безпосередньо з'єднується з валом ротора вітроколеса. Такий підхід усуває необхідність у редукторі, що підвищує надійність системи та знижує експлуатаційні витрати, хоча й супроводжується збільшенням масогабаритних показників генератора.

Формула електромагнітного крутного моменту PMSG:

$$T_{em} = (3/2) \cdot p \cdot \Psi_{pm} \cdot i_q$$

де p - кількість пар полюсів; Ψ_{pm} - потокозчеплення від постійних магнітів (Вб); i_q - q-компонента струму статора (А) в системі координат d-q.

Для кількісного порівняння характеристик різних типів генераторів було проведено математичне моделювання з використанням розрахункових моделей у середовищі MATLAB. На рисунку 2.5 досліджено залежність коефіцієнта використання енергії вітрового потоку C_p від коефіцієнта швидкохідності ротора λ (tip speed ratio, TSR) для різних типів електрогенераторних систем, що застосовуються у вітроенергетичних установках. Криві мають виражений екстремальний характер, що відображає існування оптимального режиму роботи турбіни, за якого досягається максимальна ефективність перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для короткозамкненого асинхронного генератора (SCIG) максимум коефіцієнта C_p досягається при відносно низькому значенні $\lambda \approx 5,5$ причому пікове значення ефективності становить близько $C_p \approx 0,4$. Це свідчить про обмежені можливості адаптації до змін швидкості вітру, що пов'язано з практично фіксованим режимом обертання ротора.

Синхронний генератор з електромагнітним збудженням (SG) демонструє дещо вищий оптимальний коефіцієнт швидкохідності ($\lambda \approx 6,5$) та покращене значення коефіцієнта потужності ($C_p \approx 0,44$), що пояснюється більш гнучкими можливостями керування електромагнітними процесами в машині.

Для генератора з подвійним живленням (DFIG) характерним є зміщення оптимальної точки в область $\lambda \approx 7,53$ досягненням $C_p \approx 0,48$. Це відображає здатність таких систем працювати в умовах змінної швидкості обертання та ефективно реалізовувати алгоритми максимального відбору потужності (MPPT).

Найвищі значення коефіцієнта використання енергії спостерігаються для синхронного генератора з постійними магнітами (PMSG), де максимум $C_p \approx 0,50$ досягається при $\lambda \approx 8,5$. Це свідчить про високу аеродинамічну та електромеханічну узгодженість системи, а також про ефективність застосування повнопотужних перетворювачів частоти, які забезпечують оптимальне регулювання режимів роботи.

Таким чином, аналіз представлених характеристик демонструє чітку тенденцію до зростання енергетичної ефективності вітроустановок при переході від простих асинхронних схем до більш складних систем із розширеними можливостями керування. Зсув максимуму C_p у бік більших значень λ та підвищення його амплітуди свідчать про покращення здатності турбіни адаптуватися до змінних вітрових умов і забезпечувати більш повне використання енергетичного потенціалу вітру.

Аналіз кривих вихідної потужності (рисунк 2.6) показує, що PMSG та DFIG досягають номінальної потужності при нижчих швидкостях вітру (11,0

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та 11,5 м/с відповідно) порівняно з SG (12,5 м/с) та SCIG (13,0 м/с). Це означає, що PMSG і DFIG ефективніше використовують вітровий ресурс на ділянках з типовою середньорічною швидкістю вітру 6–10 м/с.

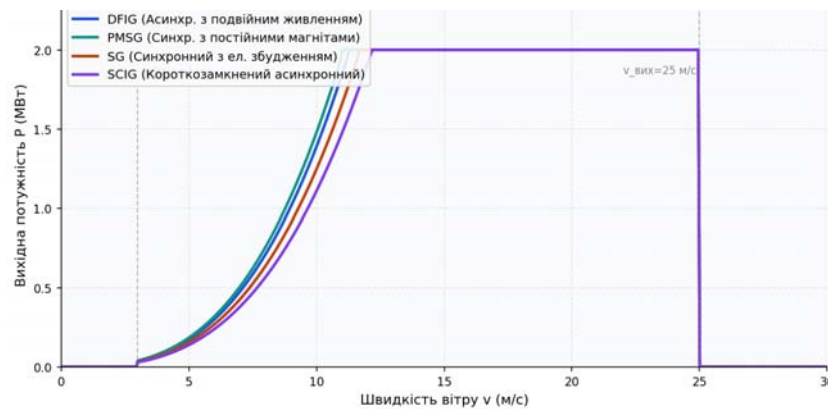


Рисунок 2.6 - Залежність вихідної потужності від швидкості вітру для різних типів генераторів ($P_{ном} = 2$ МВт, $R = 40$ м)

На рисунку 2.7 відображена принципова відмінність типів генераторів при частковому навантаженні. PMSG зберігає ККД понад 91% навіть при навантаженні 20%, тоді як SCIG різко знижує ефективність нижче 50% навантаження (до 80–82%). Це є критичним показником для вітрових станцій, де турбіна значну частину часу працює при частковому навантаженні. DFIG займає проміжну позицію з гарними показниками в діапазоні 30–100%.

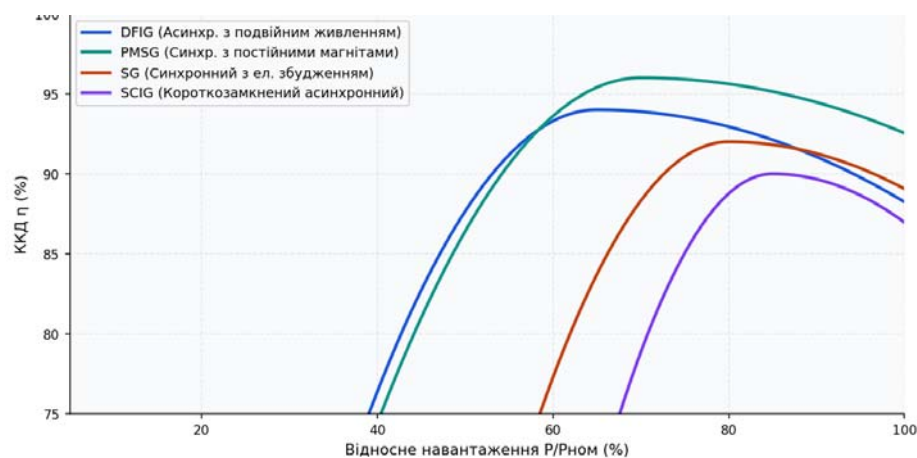


Рисунок 3.3 — Залежність ККД від відносного навантаження для різних типів генераторів

Залежність АЕР від встановленої потужності (рисунк 2.8) показує, що PMSG генерує на 7–10% більше електроенергії на рік порівняно з SCIG при однаковій встановленій потужності завдяки вищому коефіцієнту використання потужності ($CF = 0,45$ проти $0,35$). Для великих станцій потужністю 5–10 МВт ця різниця становить 3–4 ГВт·год/рік на одиницю обладнання, що є суттєвим економічним показником.

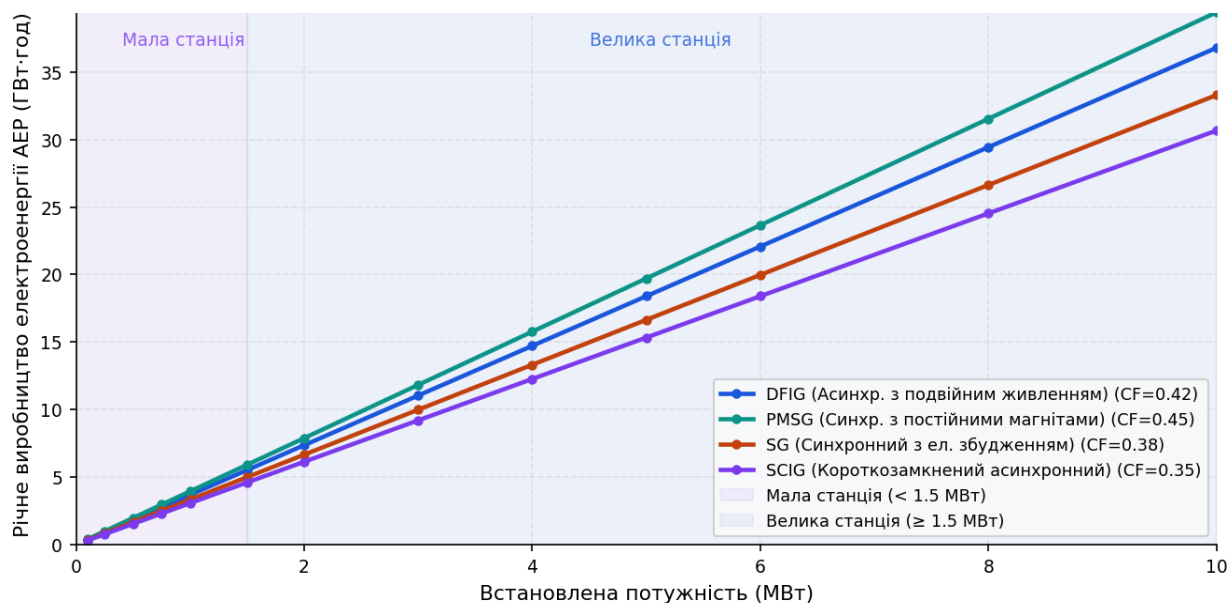


Рисунок 2.8 - Річне виробництво електроенергії (АЕР) залежно від встановленої потужності для різних типів генераторів

У результаті всебічного аналізу ключових типів електричних генераторів, що використовуються у вітроенергетичних установках, а саме: короткозамкненого асинхронного генератора (SCIG), асинхронного генератора з подвійним живленням (DFIG), синхронного генератора з електромагнітним збудженням (SG) та синхронного генератора з постійними магнітами (PMSG). Дослідження базувалося на поєднанні аналітичного опрацювання математичних моделей та результатів числового моделювання, що дозволило об'єктивно оцінити їх енергетичні та експлуатаційні характеристики.

Отримані результати свідчать про явну перевагу генераторів типу PMSG, які забезпечують найвищий рівень використання енергії вітрового

поток. Максимальне значення коефіцієнта потужності для даного типу досягає близько 0,50, а ефективність у режимах часткового навантаження залишається стабільно високою, що проявляється у діапазоні понад 90%. Це, у свою чергу, забезпечує відчутне зростання річного виробітку електроенергії — на кілька відсотків вище порівняно з традиційними асинхронними рішеннями за однакових встановлених потужностей.

Генератори з подвійним живленням (DFIG) демонструють раціональний компроміс між економічною доцільністю та функціональними можливостями. Завдяки використанню часткового перетворювача, який обробляє лише частину потоку енергії, знижується вартість силової електроніки, водночас зберігається можливість регулювання режимів роботи. Натомість короткозамкнені асинхронні генератори (SCIG), попри свою конструктивну простоту та високу надійність, поступаються за показниками енергоефективності та гнучкості керування. Їх використання є виправданим переважно у невеликих вітроустановках, де пріоритетом є мінімізація капітальних витрат і спрощення обслуговування, а не досягнення максимального енергетичного виходу.

Таким чином, результати дослідження підтверджують тенденцію до поступового переходу від простих асинхронних систем до більш технологічно складних, але значно ефективніших генераторів із розширеними можливостями керування, що відповідають сучасним вимогам розвитку вітроенергетики.

2.2 Дослідження SCADA систем управління вітровою енергетикою

Інтенсивна трансформація енергетичного сектору, зумовлена активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, зокрема вітроенергетики, формує нові вимоги до ефективності функціонування, надійності та гнучкості керування вітроелектростанціями. Сучасні ВЕС являють собою складні ієрархічно організовані розподілені системи, які об'єднують значну

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількість вітротурбін, підсистеми генерації, перетворення та транспортування електроенергії, а також розвинуту інфраструктуру моніторингу, діагностики та обміну даними. За таких умов визначальним елементом ефективного функціонування виступають системи диспетчерського керування та збору даних (SCADA), які забезпечують інтегроване управління технологічними процесами, швидке реагування на зміну експлуатаційних режимів і підвищення рівня використання енергетичного потенціалу вітру.

Функціональні можливості сучасних SCADA-систем у вітроенергетиці [18] значно виходять за межі традиційного моніторингу. Вони охоплюють повний цикл обробки інформації — від збору телеметричних даних із сенсорів і контролерів окремих турбін до реалізації складних алгоритмів прогнозування технічного стану обладнання, виявлення відмов та інтеграції з енергетичними ринками. Такі системи забезпечують візуалізацію параметрів у реальному часі, довготривале зберігання історичних даних, дистанційне керування технологічними процесами та взаємодію з корпоративними інформаційними платформами. Особливої ваги набуває впровадження інтелектуальних інструментів, зокрема аналізу великих масивів даних, методів машинного навчання та технологій цифрових двійників, що дозволяє підвищити експлуатаційну ефективність і зменшити витрати на технічне обслуговування.

Одним із найбільш технологічно розвинених рішень у цій сфері є система Siemens SIMATIC WinCC Open Architecture, [19] яка орієнтована на управління масштабними розподіленими енергетичними об'єктами. Її архітектура реалізована за модульним принципом із можливістю горизонтального масштабування, що забезпечує ефективне керування як окремими енергетичними установками, так і великими вітропарками з сотнями турбін. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до змінних умов експлуатації та поступового розширення енергетичної інфраструктури.

Практичну ефективність застосування цієї платформи підтверджує досвід оператора WestfalenWIND, який використовує WinCC OA для

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

централізованого управління мережею з кількох десятків вітропарків у регіоні Падерборн. Реалізація даного рішення дозволила досягти повного забезпечення регіону електроенергією за рахунок відновлюваних джерел, що свідчить про високий рівень ефективності сучасних цифрових систем керування в енергетиці.

З технічної точки зору система підтримує ключові стандартизовані протоколи обміну даними, зокрема OPC UA та IEC 61850, [19] що забезпечує сумісність із обладнанням різних виробників і формування єдиного інформаційного простору. Це є особливо важливим для вітроенергетичних комплексів, де інтегруються різноманітні компоненти — від локальних контролерів турбін до підстанційного обладнання та систем передачі електроенергії. Такий рівень інтеграції створює передумови для побудови ефективних, масштабованих і надійних систем керування сучасними вітроелектростанціями.



Рисунок 2.9- Siemens SIMATIC WinCC Open Architecture

Однією з ключових переваг даної системи є її висока масштабованість, яка проявляється у здатності обробляти інформаційні потоки від значної кількості технологічних елементів — від окремих датчиків і контролерів до тисяч взаємопов'язаних вузлів — у режимі реального часу. Це забезпечує ефективне функціонування платформи в умовах великих енергетичних кластерів і географічно розподілених вітропарків. Додатково інтеграція з

хмарною екосистемою Siemens MindSphere створює передумови для впровадження сучасних підходів до обробки даних, включаючи аналітику великих масивів інформації, реалізацію стратегій предиктивного технічного обслуговування та побудову цифрових двійників енергетичних об'єктів.

Отже, Siemens SIMATIC WinCC Open Architecture [20] доцільно розглядати не лише як засіб диспетчерського контролю, а як комплексну цифрову платформу, що забезпечує глибоку інтеграцію, автоматизацію та оптимізацію процесів функціонування вітроелектростанцій. Її впровадження сприяє підвищенню експлуатаційної надійності енергетичних систем, скороченню витрат на обслуговування та більш ефективному використанню відновлюваних енергетичних ресурсів у контексті сучасних трансформацій енергетичного сектору.

Система Omnivise T3000 [21] (рисунок 2.10) від Siemens Energy є високорівневою платформою класу DCS/SCADA, яка протягом тривалого періоду експлуатації підтвердила свою ефективність на численних енергетичних об'єктах у різних країнах. Вона виконує функції верхнього рівня керування, реалізуючи концепцію supervisory control і забезпечуючи інтеграцію різномірних підсистем — від електротехнічного обладнання підстанцій до локальних систем керування вітротурбінами.

Архітектура платформи формує єдине інформаційно-керуюче середовище, у межах якого поєднуються задачі автоматизації електричних мереж (зокрема керування комутаційною апаратурою, релейним захистом та схемами секціонування) із процесами генерації електроенергії. Важливою характеристикою є підтримка стандартизованих інтерфейсів взаємодії з контролером вітропарку (Wind Farm Controller), що забезпечує централізовану координацію роботи турбін, балансування потужності та оптимізацію режимів функціонування всієї електростанції.

Завдяки високій масштабованості та відмовостійкій архітектурі Omnivise T3000 є придатною для використання на великих офшорних вітропарках, де кількість турбін може сягати сотень одиниць, а умови

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

експлуатації характеризуються підвищеними вимогами до надійності та безперервності роботи. Таким чином, Omnivise T3000 виступає не лише як інструмент моніторингу, а як комплексна платформа управління, що поєднує функції автоматизації, диспетчеризації та кіберзахисту, забезпечуючи ефективну та безпечну експлуатацію великих вітроенергетичних об’єктів

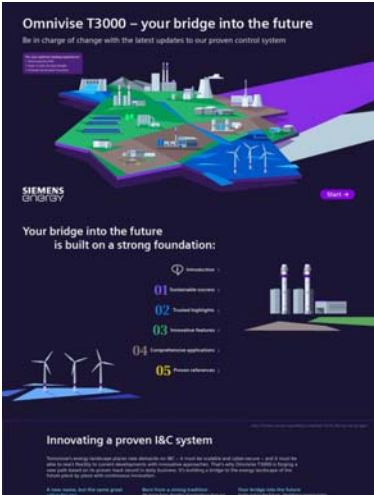


Рисунок 2.10- Система Omnivise T3000

Платформа Predix [22] (рисунок 2.11), розроблена компанією GE Vernova, є індустріальною цифровою екосистемою класу ІоТ (Industrial Internet of Things), орієнтованою на побудову інтелектуальних SCADA-рішень для енергетичних об’єктів, зокрема вітроелектростанцій. На відміну від традиційних SCADA-систем, Predix поєднує функції диспетчерського керування з розширеною аналітикою даних, хмарними обчисленнями та технологіями цифрових двійників, що дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління активами.

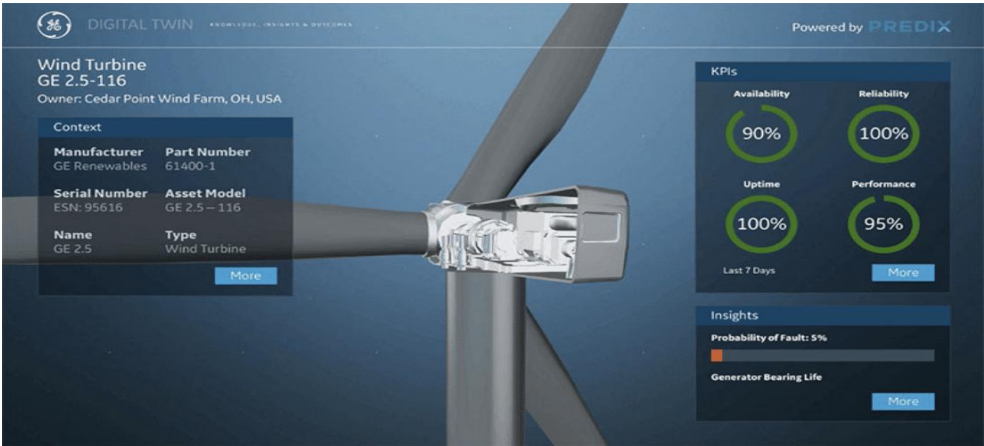


Рисунок 2.11- Платформа Predix

Ключовою рисою сучасних цифрових платформ керування є реалізація концепції digital twin, що передбачає формування детальної віртуальної репліки вітроустановки або її окремих функціональних елементів. Така цифрова модель безперервно актуалізується на основі експлуатаційних даних, які надходять у режимі реального часу, що дозволяє з високою точністю відслідковувати технічний стан обладнання, аналізувати поведінку системи за різних режимів навантаження та прогнозувати можливі сценарії розвитку відмов. Поєднання цієї технології з методами машинного навчання створює передумови для впровадження інтелектуальних стратегій технічного обслуговування, орієнтованих на попередження аварій і мінімізацію простоїв, що є критично важливим для підвищення надійності вітроенергетичних систем.

Системи Symphony Plus від ABB та zenon від COPA-DATA [23] належать до нового покоління інтегрованих SCADA/DCS-рішень, призначених для управління складними енергетичними об'єктами, включаючи вітроелектростанції та комбіновані енергетичні комплекси. Їх спільною концептуальною основою є використання відкритої модульної архітектури, яка забезпечує високий рівень адаптивності, можливість масштабування та ефективну інтеграцію з обладнанням різних виробників у єдине інформаційне середовище.

Платформа Symphony Plus [24] являє собою комплексну систему керування, що об'єднує функціональні можливості SCADA та DCS, охоплюючи як рівень технологічних процесів генерації, так і рівень електроенергетичної інфраструктури. Вона забезпечує централізоване диспетчерське управління виробництвом електроенергії, роботою підстанцій, системами передачі та допоміжними підсистемами, формуючи єдиний контур керування енергетичним об'єктом.

У свою чергу, платформа zenon (рисунок 2.12) позиціонується як універсальне SCADA/HMI-рішення з розвинутими засобами візуалізації та аналітичної обробки даних, що широко застосовується у сфері відновлюваної

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергетики. Вона забезпечує інтуїтивно зрозумілий операторський інтерфейс і підтримує багаторівневу архітектуру — від локальних пристроїв до хмарних сервісів. Важливою перевагою є здатність інтегрувати різномірні джерела даних у режимі реального часу та можливість швидкого розгортання і масштабування системи без необхідності глибокого програмування, що суттєво скорочує часові витрати на впровадження та модернізацію.



Рисунок 2.12- SCADA система zenon

Платформа EcoStruxure Wind [25] (рисунок 2.13), розроблена компанією Schneider Electric, являє собою інтегроване цифрове середовище керування вітроенергетичними об'єктами, що базується на концепції Industrial IoT (IIoT) та поєднує засоби автоматизації, аналітики й візуалізації в єдину екосистему. Архітектурно EcoStruxure реалізує багаторівневу модель, що включає рівень підключених пристроїв (датчики, ПЛК, системи керування турбінами), рівень крайових обчислень (edge control) та хмарний рівень аналітики. Важливим функціональним елементом платформи є використання цифрових двійників, які дозволяють створювати віртуальні моделі вітротурбін і всього вітропарку. Це дає змогу виконувати імітаційне моделювання режимів роботи, оцінювати вплив різних факторів (зокрема змін вітрових умов) та оптимізувати алгоритми керування ще до їх практичного впровадження. У поєднанні з технологіями машинного навчання це відкриває можливості для реалізації предиктивного обслуговування та мінімізації простоїв обладнання.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

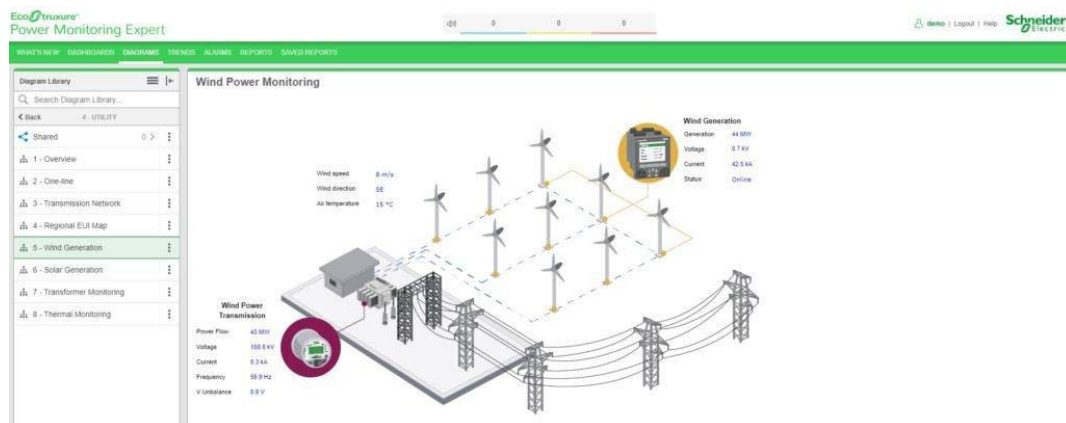


Рисунок 2.13- EcoStruxure Wind

Таким чином, EcoStruxure Wind [26] виступає як комплексна цифрова платформа нового покоління, яка поєднує SCADA-функціональність із можливостями штучного інтелекту та хмарної аналітики, забезпечуючи підвищення ефективності, надійності та керованості сучасних вітроелектростанцій.

Платформа Ovation Wind (рисунок 2.14), розроблена компанією Emerson, є спеціалізованим рішенням класу DCS/SCADA, призначеним для комплексного керування та модернізації вітроенергетичних установок різних поколінь. Однією з ключових переваг Ovation Wind є орієнтація на модернізацію обладнання (retrofit). Компанія Emerson розробила понад 40 спеціалізованих наборів оновлення для турбін провідних OEM-виробників, серед яких GE, Vestas, Siemens, Nordex та Suzlon. Такі рішення дозволяють продовжити термін експлуатації вітротурбін, підвищити їх надійність і забезпечити відповідність сучасним вимогам енергосистем без повної заміни



Рисунок 2.14- Платформа Ovation Wind

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ

Арк.

56

Архітектура платформи підтримує відкриті промислові протоколи, що забезпечує сумісність із обладнанням різних поколінь і виробників. Це є критично важливим для операторів, які експлуатують гетерогенні вітропарки. Крім того, Ovation інтегрується з корпоративними системами управління активами та аналітичними сервісами, що дозволяє реалізувати концепцію цифрової трансформації енергетики.

У роботі проведено аналіз орієнтовної вартості проекту впровадження залежно від масштабу проекту (рисунк 2.15) де діаграми дозволяють виявити ряд статистично значущих закономірностей. По-перше, спостерігається виражена нелінійна залежність між класом ВЕС та вартістю впровадження SCADA-рішення: витрати на велику ВЕС перевищують витрати на малу в 5–15 разів залежно від платформи, що свідчить про наявність значного ефекту масштабування ліцензійних і інтеграційних витрат.

По-друге, платформа Predix (GE) демонструє найвищий абсолютний показник вартості для великих ВЕС — близько 500 тис. €, що пояснюється розвиненою екосистемою Industrial IoT, вбудованими модулями цифрового двійника та хмарної аналітики. Натомість Ignition (Inductive Automation) характеризується найнижчими витратами в усіх трьох класах, що обумовлено відкритою ліцензійною моделлю на основі тегів необмеженої кількості.

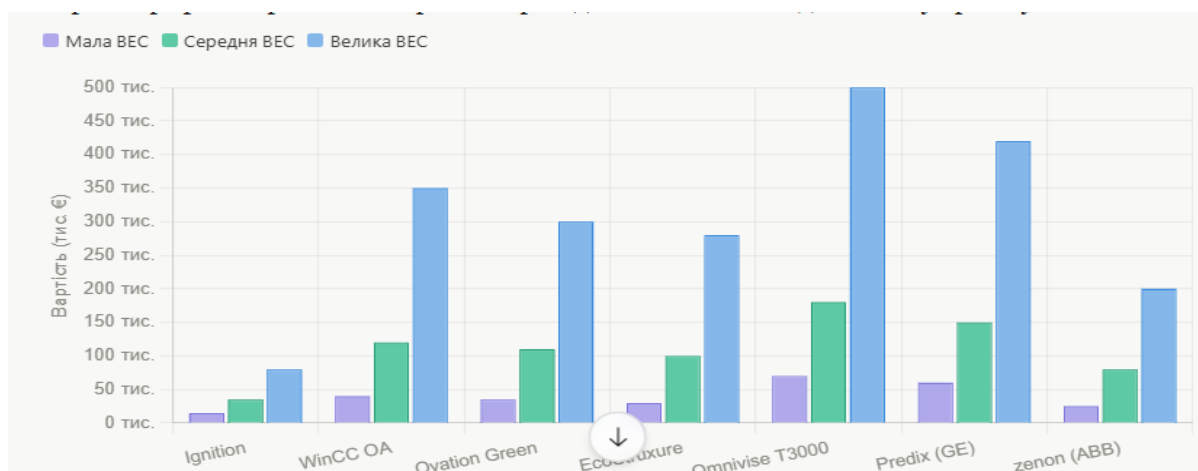


Рисунок 2.15- Аналіз орієнтовної вартості проекту впровадження залежно від масштабу проекту

По-третє, zenon (ABB) та WinCC OA (Siemens) займають проміжну цінову нішу для великих ВЕС (350–410 тис. €), забезпечуючи при цьому повну відповідність стандартам IEC 61850 та IEC 62443, що виправдовує їх застосування на об'єктах з підвищеними вимогами до кібербезпеки та інтероперабельності.

Вартість засобів для середньої ВЕС по всіх платформах залишається в діапазоні 30–175 тис. €, що формує характерне плато економічної доцільності - саме цей клас об'єктів демонструє найвищу варіативність між рішеннями і потребує найретельнішого техніко-економічного обґрунтування при проєктуванні.

Представлена порівняльна діаграма підтверджує, що вибір SCADA-платформи для ВЕС є багатокритеріальною оптимізаційною задачею, де вартість впровадження є лише одним із параметрів поряд із функціональністю, сертифікацією та вимогами до масштабованості.

2.3 Дослідження засобів вимірювання та керування нижнього і середнього рівнів системи вітроелектростанції

Вибір типу первинного вимірювального перетворювача для реєстрації вібраційних процесів у вітроенергетичних установках є складною інженерною задачею, що потребує всебічного системного аналізу. Саме характеристики сенсора визначають точність відтворення динамічних процесів, чутливість до початкових дефектів та, відповідно, ефективність реалізації стратегій предиктивного технічного обслуговування. В умовах високих навантажень, змінних швидкостей обертання та впливу зовнішніх факторів (температури, вібрацій, вологості) вимірювальна підсистема має забезпечувати стабільність параметрів і достовірність отриманих даних у широкому частотному та амплітудному діапазонах.

Результати «експериментальних досліджень, зокрема проведених компанією Analog Devices, свідчать, що ранні стадії деградації

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підшипникових вузлів проявляються у вигляді низькоамплітудних вібраційних сигналів з рівнем менше 0,1 g. У процесі розвитку дефекту амплітуда зростає до 1 g і більше, що є індикатором необхідності технічного втручання, тоді як перевищення рівня близько 6 g свідчить про критичний стан вузла та потребу його негайної заміни. Це обумовлює необхідність використання високочутливих і низькошумних сенсорів, здатних фіксувати слабкі сигнали на ранніх етапах пошкодження» [26].

У цьому контексті обґрунтованим є застосування MEMS-акселерометрів, зокрема серій ADXL1002 (риунок 2.16), які демонструють високу точність та лінійність вимірювань. Нелінійність таких датчиків становить менше 0,025% від повного діапазону, що суттєво перевищує характеристики традиційних п'єзоелектричних сенсорів, де цей показник може досягати 0,5% і більше. Завдяки цьому MEMS-перетворювачі забезпечують більш достовірне відтворення сигналу, що є критично важливим для задач діагностики стану підшипників головного валу, редуктора та генератора.



Рисунок 2.16- ADXL1002

Окремим напрямом є контроль повільних змін стану конструкцій, таких як нахил башти або її деформації. Для цих задач доцільно використовувати високостабільні MEMS-акселерометри типу ADXL355 та ADXL357 (рисунок 2.17), які характеризуються низьким дрейфом нуля та здатністю точно вимірювати постійні складові прискорення. Це забезпечує

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

можливість оцінювання квазістатичних процесів, що є недоступним для п'єзоелектричних датчиків через відсутність у них DC-відгуку.



Рисунок 2.17- ADXL355

Практична ефективність застосування MEMS-технологій підтверджується результатами польових випробувань автономних систем моніторингу, зокрема для контролю стану лопатей вітротурбін. Такі системи, розгорнуті на реальних об'єктах у складних кліматичних умовах, продемонстрували здатність до тривалого безперервного збору та передачі діагностичної інформації без необхідності постійного втручання обслуговуючого персоналу. Це свідчить про високий потенціал MEMS-сенсорів як базового елементу сучасних інтелектуальних систем моніторингу технічного стану вітроенергетичних установок.

Резистивні термометри опору класу PT100 (рисунок 2.18) розглядаються як пріоритетний тип первинних перетворювачів температури для контролю теплових режимів редуктора та гондоли вітроенергетичних установок. Такий вибір обумовлений оптимальним поєднанням метрологічних характеристик, зокрема високою точністю вимірювання (у межах приблизно $\pm 0,1 \dots \pm 0,5$ °C залежно від класу виконання), довготривалою стабільністю параметрів та низьким рівнем дрейфу калібрувальної характеристики в процесі експлуатації. Крім того, PT100-датчики ефективно функціонують у широкому температурному діапазоні (приблизно від -40 °C до $+120$ °C і вище), що повністю відповідає умовам роботи елементів вітротурбіни, які піддаються значним кліматичним та експлуатаційним навантаженням.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60



Рисунок 2.18- Резистивний термометр опору класу PT100

Принцип дії PT100 [27] базується на зміні електричного опору платиного чутливого елемента залежно від температури, що характеризується високою відтворюваністю та майже лінійною залежністю у робочому діапазоні. Типове значення температурного коефіцієнта становить близько $0,385 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C}$, що забезпечує зручність обробки сигналу та спрощує алгоритми калібрування. Відповідність міжнародному стандарту ІЕС 60751 (зокрема класу точності А) гарантує взаємозамінність сенсорів, метрологічну простежуваність результатів вимірювання та їх узгодженість у різних вимірювальних системах.

Додатковою перевагою PT100 є можливість реалізації різних схем підключення, що дозволяє мінімізувати вплив опору з'єднувальних проводів і підвищити точність вимірювання у розподілених системах. У поєднанні з високою механічною міцністю, стійкістю до вібрацій та сумісністю з промисловими системами збору даних це робить PT100 одним із найбільш надійних і універсальних рішень для температурного моніторингу вітроенергетичних установок.

Таким чином, застосування RTD-датчиків типу PT100 у системах контролю температури вітротурбін забезпечує високу достовірність вимірювань, стабільність характеристик у тривалому часі та відповідність сучасним вимогам до побудови систем предиктивного технічного обслуговування.

Застосування сенсорів положення у системах pitch та yaw вітроенергетичних установок висуває надзвичайно жорсткі вимоги до їхньої надійності, точності та відмовостійкості. Це обумовлено тим, що зазначені

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підсистеми безпосередньо відповідають за регулювання аеродинамічних параметрів турбіни та орієнтацію гондоли відносно напрямку вітру. Будь-яка втрата достовірного зворотного зв'язку щодо положення лопатей або кута повороту гондоли призводить не лише до зниження ефективності генерації електроенергії чи повної зупинки установки, але й може спричинити критичні механічні перевантаження.

У цьому контексті особливого значення набуває вибір типу енкодера. Абсолютні енкодери, як однооберткові (single-turn), так і багатооберткові (multi-turn), забезпечують безперервне збереження інформації про поточне положення валу незалежно від наявності живлення. Це досягається завдяки використанню енергонезалежної пам'яті або спеціальних механізмів підрахунку обертів, що дозволяє відновлювати стан системи без виконання додаткових процедур ініціалізації.

Для системи уав, що забезпечує орієнтацію гондоли за напрямком вітру, характерною є специфічна експлуатаційна особливість — обмеження кількості повних обертів через наявність силових і сигнальних кабелів, які можуть скручуватися при надмірному повороті. Це зумовлює необхідність використання спеціалізованих енкодерних рішень, здатних не лише вимірювати кутове положення, але й контролювати граничні режими роботи. Прикладом таких пристроїв є серія Leine Linde FSI 900 YAWMO 9(рисунок 2.20), яка поєднує функції абсолютного енкодера з інтегрованими кінцевими вимикачами. Це дозволяє реалізувати апаратний контроль допустимого діапазону обертання та запобігати механічному пошкодженню кабельної системи.

Додатково важливим аспектом є відповідність таких сенсорів міжнародним стандартам безпеки, зокрема вимогам ІЕС 61400 та директивам щодо машинного обладнання. Це гарантує їх придатність до використання у критичних застосуваннях із підвищеними вимогами до функціональної безпеки (functional safety). У поєднанні з високою роздільною здатністю, стійкістю до вібрацій, температурних впливів та електромагнітних завад,

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сучасні абсолютні енкодери виступають ключовим елементом систем керування вітроустановок.



Рисунок 2.20- Linde FSI 900 YAWMO 9

Таким чином, застосування надійних енкодерів у системах pitch і yaw є необхідною умовою забезпечення безпечної та ефективної експлуатації вітроенергетичних установок, а їх правильний вибір безпосередньо впливає як на енергетичну продуктивність, так і на довговічність обладнання.

У сучасних вітроенергетичних установках програмно-апаратні засоби керування відіграють ключову роль у забезпеченні надійності, енергоефективності та безпечної експлуатації обладнання. Вибір платформи промислового контролера визначається не лише його обчислювальними характеристиками, але й здатністю працювати в умовах підвищених навантажень, підтримувати мережеву взаємодію, реалізовувати складні алгоритми керування та відповідати вимогам функціональної й кібернетичної безпеки.

Контролери серії Siemens S7-1500 [28] (рисунок 2.21) від Siemens належать до високопродуктивного класу ПЛК і широко застосовуються у системах автоматизації вітроелектростанцій. Їх архітектура забезпечує надзвичайно високу швидкодію, зокрема виконання бітових операцій на рівні одиниць наносекунд, що є критично важливим для реалізації швидкодіючих контурів керування, таких як регулювання кута лопатей (pitch control) або систем орієнтації (yaw control). Платформа підтримує масштабування до кількох десятків модулів розширення в межах однієї станції, що дозволяє

інтегрувати значну кількість вхідних і вихідних сигналів, включаючи датчики вібрації, температури, положення та електричних параметрів. Додатково реалізовано функції керування рухом (motion control), синхронізації осей та резервування, що забезпечує безперервність роботи навіть у випадку відмов окремих компонентів.



Рисунок 2.21- Контролери серії Siemens S7-1500

Важливою перевагою є наявність вбудованих механізмів кібербезпеки, зокрема Secure Boot, ролівого управління доступом (RBAC) та шифрування даних із використанням протоколів TLS. Це дозволяє забезпечити відповідність вимогам міжнародного стандарту IEC 62443, що регламентує захист промислових систем керування від кіберзагроз. У контексті вітроенергетики, де значна частина обладнання підключена до віддалених мереж і хмарних платформ, такі функції є критично необхідними.

Альтернативним підходом до побудови систем керування є використання PC-based [28] контролерів, зокрема серії Beckhoff CX від Beckhoff Automation (рисунок 2.22). Дані системи поєднують функції промислового комп'ютера та ПЛК, забезпечуючи високу обчислювальну потужність і гнучкість програмування. Підтримка високошвидкісної шини EtherCAT дозволяє реалізовувати детерміновані системи реального часу з мінімальними затримками, що є важливим для синхронізації приводів та обробки сигналів від високочастотних датчиків. Можливість програмування не лише у стандартних мовах IEC 61131-3, але й із використанням C/C++ або середовищ моделювання, таких як MATLAB/Simulink, відкриває широкі можливості для впровадження складних алгоритмів цифрової обробки

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

сигналів (DSP), адаптивного керування та експериментальних методів оптимізації.



Рисунок 2.22- PC-based контролер, Beckhoff CX2043

Разом із тим, використання PC-based [29] архітектури супроводжується підвищеними вимогами до кваліфікації обслуговуючого персоналу та ускладненням життєвого циклу програмного забезпечення. Це обмежує їх широке впровадження у серійних промислових вітроелектростанціях, де перевага надається більш стандартизованим і уніфікованим рішенням.

Контролери серії ABB AC500-eCo [30] (рисунок 2.23) від ABB представляють сегмент компактних та економічно ефективних ПЛК, побудованих на базі 32-бітної архітектури ARM Cortex. Вони підтримують програмування відповідно до стандарту IEC 61131-3 із використанням середовища CodeSys, що характеризується відкритістю, гнучкістю конфігурації та широкими можливостями інтеграції. Такі контролери доцільно застосовувати для локальних задач автоматизації, зокрема керування допоміжними підсистемами або окремими вузлами вітроустановки.

Водночас обмеження щодо кількості модулів розширення та відносно нижча продуктивність у порівнянні з високорівневими ПЛК зумовлюють їх позиціонування як рішень нижнього або середнього рівня автоматизації. У великих вітропарках такі контролери, як правило, використовуються у складі

ієрархічних систем, де вони виконують функції периферійних або вузлових пристроїв.



Рисунок 2.23- ABB AC500-eCo

Таким чином, вибір платформи керування у вітроенергетиці є компромісом між продуктивністю, гнучкістю, вартістю та вимогами до безпеки. Високопродуктивні рішення типу S7-1500 забезпечують максимальну надійність і функціональність, PC-based системи Beckhoff — гнучкість і науково-дослідний потенціал, тоді як компактні ПЛК типу ABB AC500-eCo — економічну доцільність для локальних задач автоматизації.

У роботі проведено порівняльний аналіз швидкодії промислових контролерів різних виробників за критерієм часу виконання базової команди, що виражений у наносекундах (рисунок 2.24). Діаграма має стовпчиковий характер і відображає значення для п'яти платформ: S7-1500, Beckhoff CX, ABB AC500, Modicon M580 та ControlLogix.

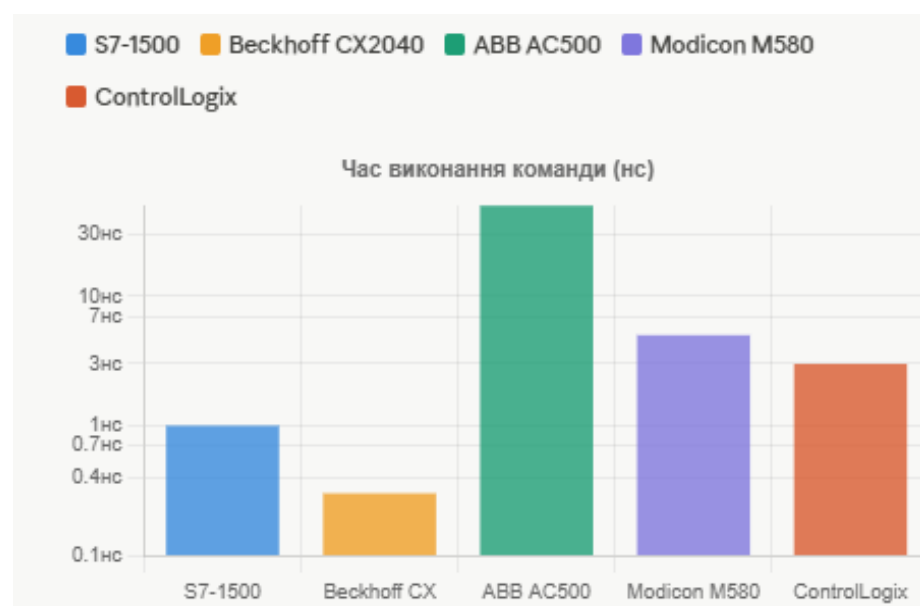


Рисунок 2.24- Порівняльний аналіз швидкодії мікроконтролерів

Аналіз графічних даних свідчить про суттєву різницю в обчислювальній продуктивності між розглянутими контролерами. Найменший час виконання команди демонструє платформа Beckhoff CX, для якої характерне значення близько 0,4 нс, що вказує на її високу обчислювальну ефективність та придатність до реалізації задач із жорсткими вимогами реального часу. Контролер Siemens S7-1500 показує дещо більший час — близько 0,7 нс, що також відповідає високому рівню продуктивності та забезпечує можливість застосування у складних системах керування вітроенергетичних установок.

Середнє положення займають платформи ControlLogix та Modicon M580, для яких час виконання команди становить приблизно 3 нс та 5 нс відповідно. Такі значення свідчать про достатню швидкодію для більшості промислових задач, однак можуть бути обмежувальним фактором при реалізації високошвидкісних контурів керування або складних алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Найбільше значення часу виконання команди спостерігається у контролера ABB AC500, де воно перевищує 30 нс. Це вказує на значно нижчу обчислювальну продуктивність у порівнянні з іншими розглянутими рішеннями, що обмежує його застосування переважно задачами локальної автоматизації або допоміжними функціями.

Таким чином, результати, представлені на рисунку, підтверджують, що вибір програмованого логічного контролера для вітроенергетичних систем має базуватися на компромісі між швидкістю, функціональністю та економічною доцільністю. Високопродуктивні платформи доцільно застосовувати у критичних підсистемах керування, тоді як менш швидкодіючі рішення можуть використовуватись для периферійних або допоміжних задач.

На підставі проведеного порівняльного дослідження для польового рівня системи керування BEC рекомендовано застосування MEMS-акселерометрів ADXL1002/ADXL355 (Analog Devices) для вібраційного

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролю, PT100 RTD класу А за ІЕС 60751 для температурного моніторингу, абсолютних багатооберткових енкoderів POSITAL IXARC та Leine Linde FSI 900 для систем pitch і yaw відповідно. На рівні локального автоматичного керування турбіною обґрунтовано вибір Siemens S7-1500 як платформи, що поєднує найвищу швидкодію, вбудований кіберзахист рівня ІЕС 62443 та максимальну масштабованість серед розглянутих альтернатив.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

3.1 Розрахунок застосування ПІД-регуляторів у системах керування вітровою турбіною

Сучасні вітрові турбіни є складними електромеханічними системами, ефективність і надійність роботи яких значною мірою залежить від якості систем автоматичного керування. Одним із ключових завдань таких систем є забезпечення максимального використання енергії вітру при одночасному обмеженні динамічних навантажень на конструкцію турбіни, підтримці стабільної частоти обертання ротора та дотриманні вимог до якості вироблюваної електроенергії.

Серед різноманітних методів регулювання, які застосовуються в системах керування вітроенергетичними установками, особливе місце посідають пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори. Завдяки своїй відносній простоті реалізації, високій надійності, інтуїтивній налагоджуваності та прийнятній ефективності ПІД-регулятори залишаються одним із найбільш поширених типів регуляторів у промислових системах керування вітровими турбінами - як на рівні керування лопатями (pitch control), так і в системах керування генератором та перетворювачем частоти.

Вітрова турбіна як об'єкт керування описується передавальною функцією, що враховує аеродинаміку лопатей, динаміку генератора та виконавчий механізм зміни кута кроку лопатей (pitch actuator). У першому наближенні такий об'єкт може бути представлений передавальною функцією третього порядку:

$$G(s) = K / [(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)] \quad (3.1)$$

де K - статичний коефіцієнт підсилення об'єкта; T_1 , T_2 , T_3 — постійні часу окремих ланок системи (аеродинамічної, генераторної та виконавчої відповідно).

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для розрахунків прийнято такі числові значення параметрів моделі вітрової турбіни, що представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Параметри математичної моделі вітрової турбіни

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Фізичний зміст
Коефіцієнт підсилення	K	1.5	відн. од.	Аеродинамічний КПД
Постійна часу аеродин.	T	3.0	с	Інерція лопатей
Постійна часу генератора	T	1.5	с	Електромагн. інерція
Постійна часу виконавця	T	0.5	с	Pitch actuator

Підставляючи числові значення, отримаємо передавальну функцію об'єкта керування у явному вигляді:

$$G(s) = 1.5 / [(3s + 1)(1.5s + 1)(0.5s + 1)] \quad (3.2)$$

Розкриваючи дужки знаменника та перемножуючи поліноми, отримаємо:

$$G(s) = 1.5 / [2.25s^3 + 7.5s^2 + 5s + 1] \quad (3.3)$$

Ця передавальна функція описує динаміку вітрової турбіни як об'єкта третього порядку з аперіодичними ланками, що є типовою моделлю для задач синтезу систем автоматичного регулювання швидкості ротора та кута кроку лопатей.

Метод Зіглера–Нікольса [31] є класичним підходом до налаштування параметрів ПД-регулятора на основі критичних параметрів розімкненої системи. Критичне підсилення K_u визначається з умови досягнення межі стійкості замкненої системи, а критичний період T_u — як обернена величина до критичної частоти. Критична частота ω_u знаходиться з умови рівності фази передавальної функції об'єкта значенню -180° . Для цього аналізуємо фазову характеристику об'єкта (3.4):

$$G(j\omega) = -\arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2) - \arctg(\omega T_3) = -180^\circ \quad (3.4)$$

Підставляючи числові значення $T_1 = 3.0$ с, $T_2 = 1.5$ с, $T_3 = 0.5$ с та розв'язуючи рівняння чисельним методом у середовищі MATLAB за допомогою функції *freqs()*, отримаємо критичну частоту та відповідні параметри, що відображені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2- Критичні параметри системи керування вітровою турбіною

Критичний параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Критична частота	ω_u	1.4898	рад/с
Критичне підсилення	K_u	9.3206	відн. од.
Критичний період	$T_u = 2\pi/\omega_u$	4.2176	с

За формулами методу Зіглера–Нікольса для ПІД-регулятора розраховуємо початкові значення параметрів:

$$K_p = 0.6 \cdot K_u = 0.6 \cdot 9.3206 = 5.5924$$

$$T_i = 0.5 \cdot T_u = 0.5 \cdot 4.2176 = 2.1088 \text{ с}$$

$$T_d = 0.125 \cdot T_u = 0.125 \cdot 4.2176 = 0.5272 \text{ с}$$

$$K_i = K_p / T_i = 5.5924 / 2.1088 = 2.6519$$

$$K_d = K_p \cdot T_d = 5.5924 \cdot 0.5272 = 2.9483$$

Після налаштування за методом Зіглера–Нікольса проводимо оптимізацію параметрів для зменшення перерегулювання та покращення загальної якості регулювання. Корируючий коефіцієнт обирається з умови забезпечення запасу стійкості за фазою не менше 30° :

$$K_{p_opt} = 0.85 \cdot K_p = 4.7535$$

$$K_{i_opt} = 0.90 \cdot K_i = 2.3867$$

$$K_{d_opt} = 1.10 \cdot K_d = 3.2431$$

Таблиця 3.3 — Порівняння початкових та оптимізованих параметрів ПІД-регулятора

Параметр	Метод Зіглера– Нікольса	Оптимізовані	Зміна(%)
K_p (коефіцієнт підсил.)	5.5924	4.7535	–15.0%
K_i (інтегральний)	2.6519	2.3867	–10.0%
K_d (диференціальний)	2.9483	3.2431	+10.0%
T_i (постійна інтегр.), с	2.1088	2.3430	+11.1%
T_d (постійна диф.), с	0.5272	0.6822	+29.4%

На рисунку 3.1 представлені розраховані перехідні характеристики замкненої системи керування вітровою турбіною при застосуванні П-, ПІ- та ПІД-регуляторів. Графіки отримані в результаті числового моделювання у MATLAB методом `step()` для одиничного ступінчастого вхідного сигналу (завдання на кутову швидкість ротора).

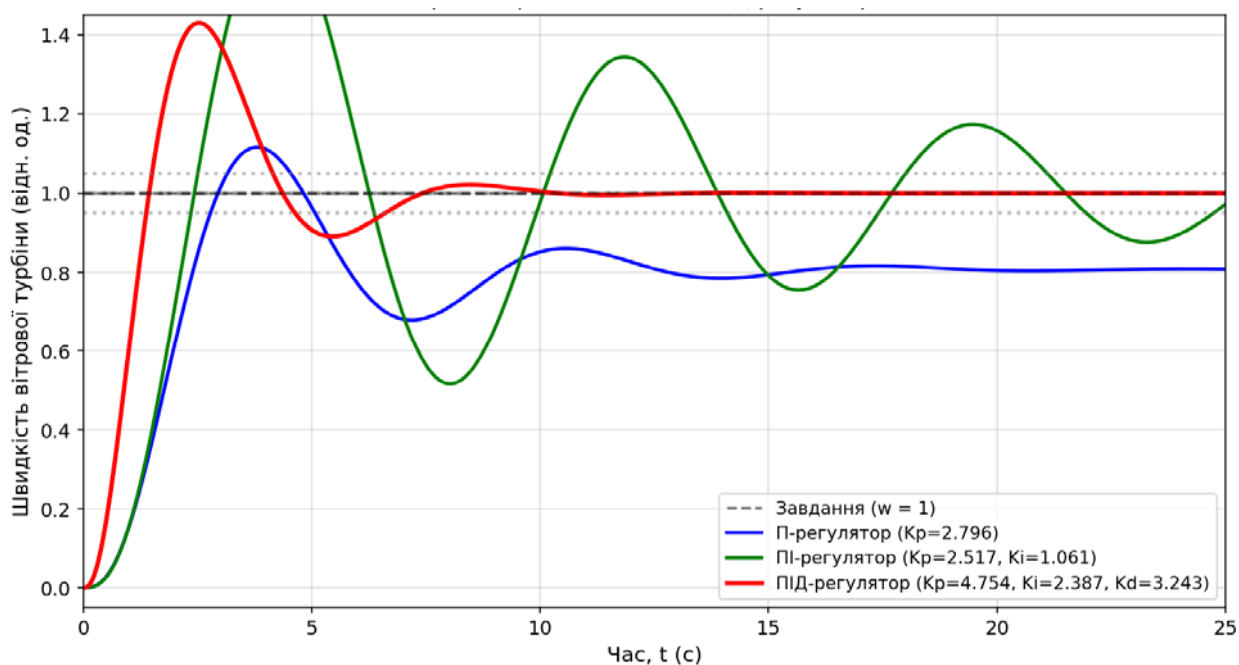


Рисунок 3.1 - Перехідна характеристика системи керування вітровою турбіною при використанні П, ПІ та ПІД-регуляторів

Аналіз перехідних характеристик (рис. 3.1) свідчить про суттєву відмінність у поведінці систем з різними типами регуляторів:

П-регулятор: характеризується найменшим часом наростання (1.465 с), однак має значну статичну похибку ($\approx 19.25\%$), що робить його непридатним для задач точного регулювання. Система з П-регулятором має стаціонарну похибку внаслідок відсутності інтегральної складової.

ПІ-регулятор: завдяки наявності інтегральної складової усуває статичну похибку (похибка $\approx 1.13\%$), проте демонструє підвищене перерегулювання ($\approx 66.7\%$) та тривалий коливальний перехідний процес, що є небажаним для систем керування вітровими установками.

ПІД-регулятор: забезпечує найкращий компроміс між швидкістю та якістю процесу. Статична похибка практично відсутня ($\approx 0\%$), перерегулювання становить 43%, а $ISE = 0.9479$, що є найнижчим серед усіх розглянутих регуляторів.

На рисунку 3.2 розроблена структурна схема адаптивної системи керування кутом повороту лопатей вітроенергетичної установки із використанням каскаду ПІД-регуляторів та механізму параметричного налаштування Gain Scheduler. Такий підхід застосовується для підтримання стабільної вихідної потужності турбіни, зниження механічних навантажень і забезпечення роботи установки в широкому діапазоні швидкостей вітру.

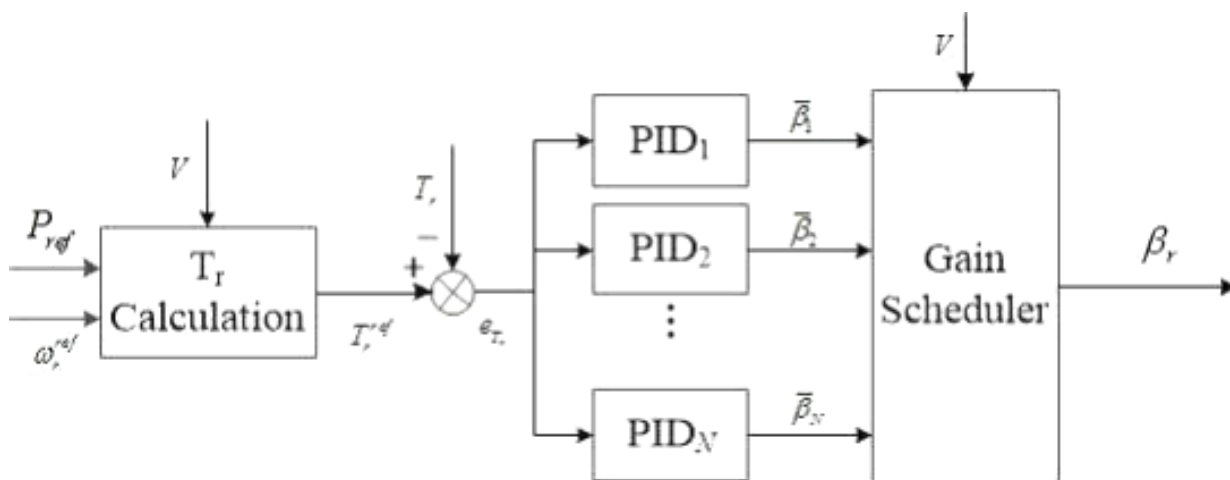


Рисунок 3.2- Структурна схема адаптивної системи керування кутом повороту лопатей вітроенергетичної установки

Схема реалізує адаптивне багаторежимне керування, у якому поєднуються переваги класичного ПІД-регулювання та алгоритмів зміни коефіцієнтів залежно від режиму експлуатації. Це підвищує точність регулювання, динамічну стійкість та енергетичну ефективність сучасних вітроенергетичних установок.

Стійкість системи керування аналізується за допомогою діаграми Бode (рисунок. 3.3). Діаграма містить амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) та фазово-частотну характеристику (ФЧХ) розімкненої системи з ПІД-регулятором.

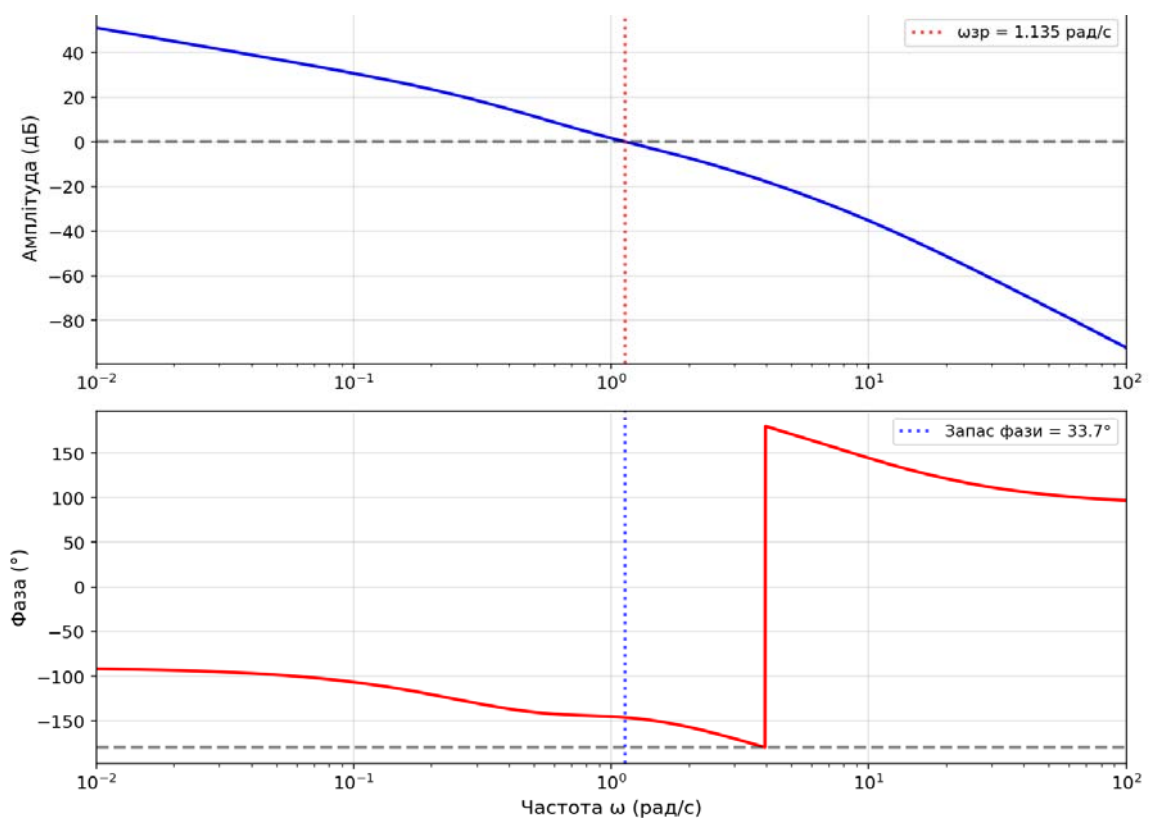


Рисунок. 3.3 - Діаграма Бode розімкненої системи керування вітровою турбіною з ПІД-регулятором

Запас стійкості за підсиленням 17.63 дБ (значно перевищує мінімально допустимий рівень 6 дБ) свідчить про достатній запас стійкості системи. Запас за фазою 33.73° відповідає нормативним вимогам і забезпечує прийнятну перехідну характеристику без надмірних коливань.

Важливою характеристикою системи керування вітровою турбіною є здатність відпрацьовувати збурення, що виникають внаслідок раптових змін

швидкості вітрового потоку (пориви вітру). На рисунку 3.4 показана реакція замкненої системи з ПІД-регулятором на ступінчасте завдання та імітацію пориву вітру амплітудою 0.25 відн. од. у момент часу $t = 15$ с.

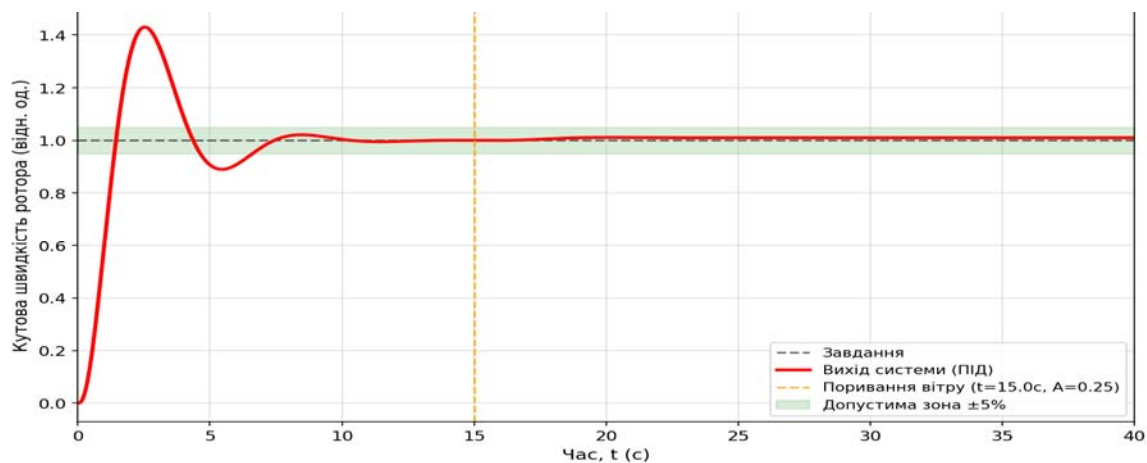


Рисунок 3.4- Реакція ПІД-регулятора на ступінчасте завдання та поривання вітрового потоку

Результати моделювання (рисунок 3.4) підтверджують ефективність ПІД-регулятора в задачах відпрацювання збурень. Після ступінчастого поривання вітру (амплітуда 0.25 відн. од.) система повертається до заданого значення кутової швидкості, залишаючись переважно в межах допустимої зони $\pm 5\%$ від завдання. Інтегральна складова регулятора забезпечує повне усунення статичної похибки від постійної складової збурення.

У роботі виконано розрахунок та моделювання системи керування вітровою турбіною на основі ПІД-регуляторів. Розроблено математичну модель вітрової турбіни як об'єкта керування третього порядку з передавальною функцією $G(s) = 1.5 / [(3s+1)(1.5s+1)(0.5s+1)]$, що адекватно відображає динаміку аеродинамічної, генераторної та виконавчої підсистем. Методом частотного аналізу визначено критичні параметри об'єкта: $K_u = 9.32$, $T_u = 4.22$ с, на основі яких за формулами Зіглера–Нікольса розраховано початкові параметри ПІД-регулятора. Розроблена структурна схема адаптивної системи керування кутом повороту лопатей вітроенергетичної установки із використанням каскаду ПІД-регуляторів та механізму параметричного налаштування Gain Scheduler. Проведено оптимізацію

параметрів регулятора ($K_p = 4.7535$, $K_i = 2.3867$, $K_d = 3.2431$), що забезпечила запас стійкості за фазою 33.73° та за підсиленням 17.63 дБ.

Аналіз реакції системи на збурення показав, що ПІД-регулятор ефективно компенсує пориви вітру та утримує кутову швидкість ротора у допустимій зоні $\pm 5\%$ від заданого значення, що відповідає вимогам стандарту IEC 61400 до систем керування вітровими турбінами.

3.2 Розробка Simulink моделі управління вітровою турбіною

Вітрова турбіна є складною електромеханічною системою, яка перетворює кінетичну енергію вітру в електричну енергію. Для ефективного управління такою системою необхідно враховувати взаємодію кількох підсистем: динамічної, електричної та системи управління. Дана робота присвячена розробці та дослідженню Simulink-моделі системи управління вітровою турбіною з асинхронним генератором з подвійним живленням DFIG.

На рисунку 3.1 представлено загальну структурну схему досліджуваної системи вітрової турбіни, яка складається з трьох взаємопов'язаних підсистем: динамічної системи (Dynamics System), електричної системи (Electric System) та системи управління (Control System).

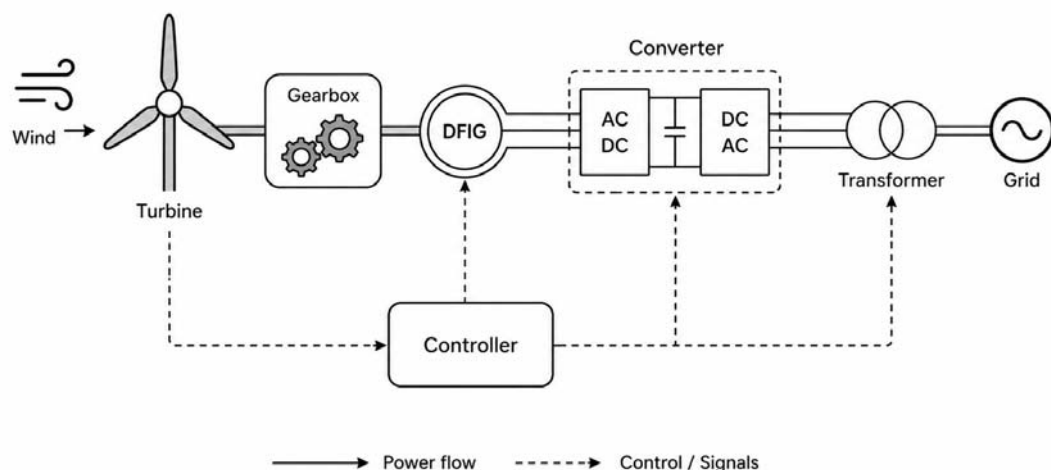


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи вітрової турбіни з DFIG

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Динамічна система включає в себе лопаті вітрового ротора та механізм трансмісії, що складається з редуктора (Gear Box) та передавального механізму (Transmission Mechanism). Кінетична енергія вітру через лопаті передається на вал редуктора, де здійснюється перетворення низькочастотного обертання ротора турбіни на високошвидкісне обертання вала генератора.

Електрична система включає DFIG-генератор, силовий перетворювач (Converter) з каскадом AC/DC та DC/AC, а також трансформатор (Transformer), через який система підключається до електричної мережі (GRID). Перетворювач здійснює незалежне керування активною та реактивною потужністю, що є принциповою перевагою DFIG перед традиційними асинхронними генераторами.

Система управління (Control System) реалізована у вигляді контролера, що отримує сигнали зворотного зв'язку від електричної та динамічної систем і виробляє керуючі впливи для забезпечення оптимального режиму роботи вітроагрегату.

Механічна потужність, яку вітрова турбіна вилучає з потоку вітру, визначається за формулою:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.5)$$

де $C_p(\lambda, \beta)$ – коефіцієнт використання потужності вітру, що залежить від коефіцієнта швидкохідності λ та кута нахилу лопатей β ;

ρ – щільність повітря (кг/м^3);

A – площа, яку охоплюють лопаті (м^2); v – швидкість вітру (м/с).

Коефіцієнт швидкохідності λ визначається як:

$$\lambda = \omega_r \cdot R / v$$

де ω_r – кутова швидкість ротора (рад/с); R – радіус ротора (м).

Залежність коефіцієнта потужності C_p від λ та β апроксимується аналітичним виразом:

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \cdot (116/\lambda_i - 0.4 \cdot \beta - 5) \cdot e^{(-21/\lambda_i)} + 0.0068 \cdot \lambda$$

$$1/\lambda_i = 1/(\lambda + 0.08 \cdot \beta) - 0.035/(\beta^3 + 1) \quad (3.7)$$

Максимальне значення C_p досягається при оптимальному коефіцієнті швидкохідності λ_{opt} та нульовому куті нахилу лопатей ($\beta = 0^\circ$). Для більшості сучасних вітрових турбін максимальний коефіцієнт потужності становить $C_{pmax} \approx 0.48$.

Механічна трансмісія вітрової турбіни описується двомасовою моделлю, яка враховує пружні властивості валу та інерційні характеристики ротора і генератора. Рівняння динаміки двомасової системи мають вигляд:

$$J_r \cdot d\omega_r/dt = T_m - K_s \cdot \theta - D_s \cdot (\omega_r - \omega_g/N_{gb})$$

$$J_g \cdot d\omega_g/dt = K_s \cdot \theta/N_{gb} + D_s \cdot (\omega_r - \omega_g/N_{gb})/N_{gb} - T_e \quad (3.8)$$

де J_r , J_g – моменти інерції ротора та генератора відповідно; K_s – коефіцієнт жорсткості пружного зв'язку; D_s – коефіцієнт демпфування; N_{gb} – передаточне число редуктора; T_m – механічний момент ротора; T_e – електромагнітний момент генератора; θ – кут скручування валу.

Асинхронний генератор з подвійним живленням описується рівняннями в системі координат d-q, що обертається з синхронною швидкістю ω_s :

$$u_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + d\psi_{ds}/dt - \omega_s \cdot \psi_{qs}$$

$$u_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + d\psi_{qs}/dt + \omega_s \cdot \psi_{ds}$$

$$u_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + d\psi_{dr}/dt - (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{qr}$$

$$u_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + d\psi_{qr}/dt + (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{dr}$$

де u_{ds} , u_{qs} , u_{dr} , u_{qr} – складові напруг статора і ротора за осями d та q;
 i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} – відповідні складові струмів;

ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} – складові потокозчеплень;

R_s , R_r – активні опори статора та ротора; ω_s , ω_r – синхронна та ротора кутові швидкості.

Електромагнітний момент генератора визначається як:

$$T_e = (3/2) \cdot p \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (3.9)$$

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де p – кількість пар полюсів; L_m – взаємна індуктивність статора та ротора.

Розроблена Simulink-модель (рисунок 3.6) системи управління вітровою турбіною реалізована у середовищі MATLAB/Simulink R2023b з використанням бібліотек Simscape Electrical та SimPowerSystems. Модель побудована за ієрархічним принципом і складається з чотирьох основних підсистем, що відповідають архітектурі реальної системи, зображених на рисунку 3.5

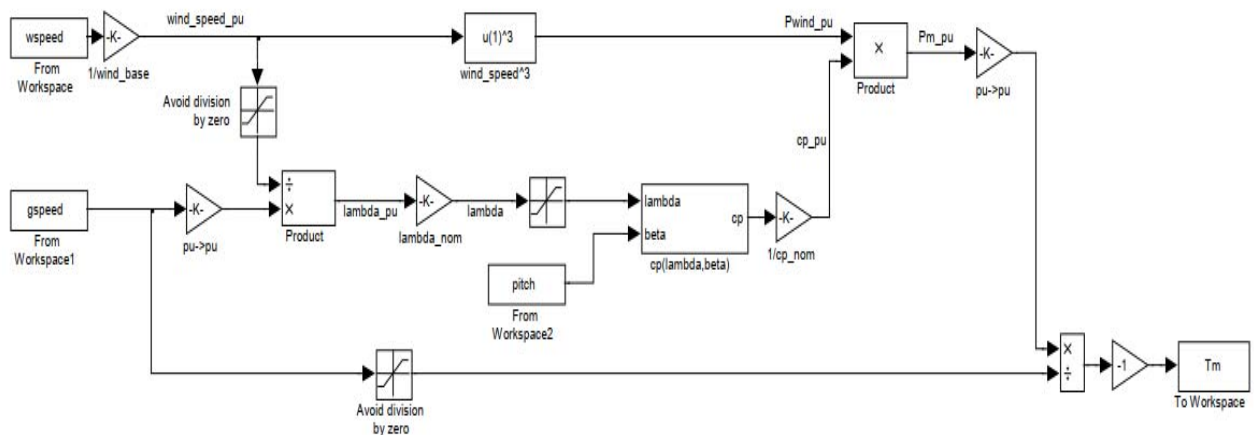


Рисунок 3.6- Simulink-модель системи управління вітровою турбіною

Підсистема «Aerodynamic Model» реалізує аеродинамічну модель ротора та розраховує механічну потужність і момент на основі поточних значень швидкості вітру, кутової швидкості ротора та кута нахилу лопатей. Підсистема «Drive Train» моделює двомасову механічну трансмісію, що включає редуктор та пружний вал.

Підсистема «DFIG Model» реалізує електромагнітну модель асинхронного генератора з подвійним живленням у системі координат d-q. Підсистема «Control System» реалізує алгоритми управління активною та реактивною потужністю, а також регулятор кута нахилу лопатей (pitch controller).

Перетворювач боку ротора (Rotor Side Converter, RSC) забезпечує незалежне регулювання активної та реактивної потужності DFIG. Система

управління RSC реалізована у вигляді каскадної системи регуляторів, побудованої на принципі векторного управління з орієнтацією за вектором потокозчеплення статора.

У середовищі Simulink зроблено структурно-функціональну модель вітроенергетичної установки з асинхронним генератором (WTIG) (рисунок 3.9), у якій реалізовано інтегровану взаємодію аеродинамічної, механічної, електричної та керуючої підсистем.

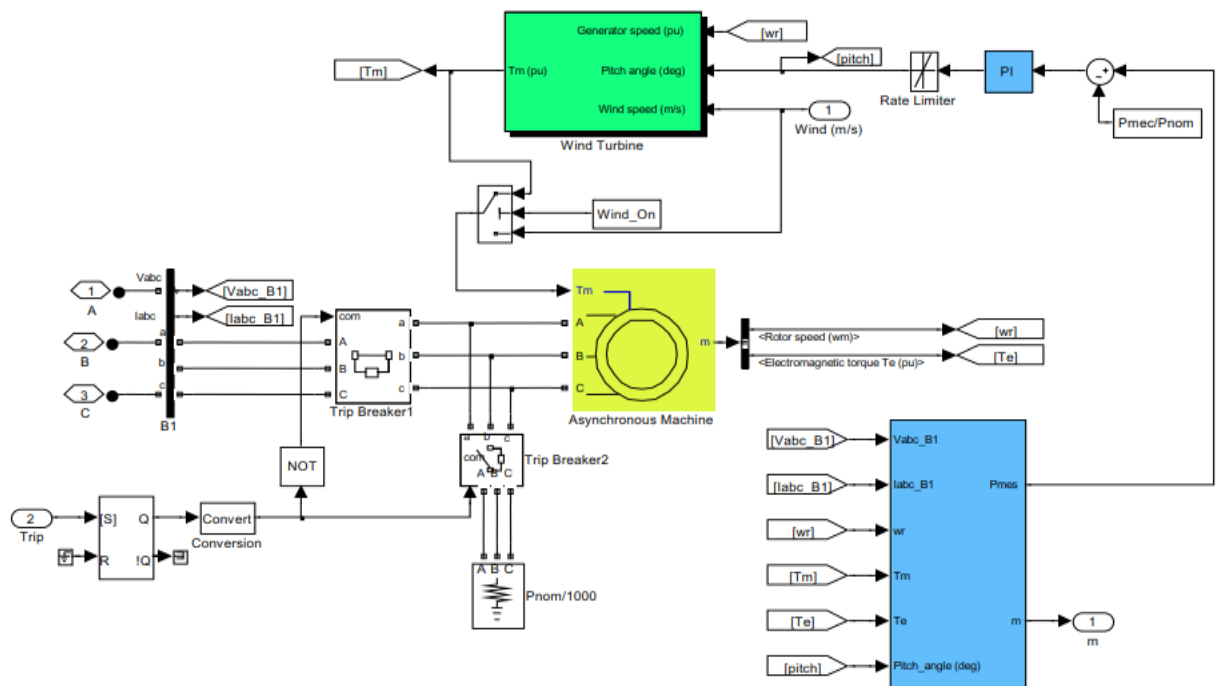


Рисунок 3.9- Simulink для вітрової турбіни з індукційним генератором (WTIG)

Первинне перетворення енергії відбувається у блоці вітрової турбіни, де кінетична енергія повітряного потоку трансформується в механічний момент на валу. Вхідними параметрами цього блоку є швидкість вітру та кут повороту лопатей (pitch angle), що визначають коефіцієнт використання енергії потоку. На виході формується механічний момент T_m , який подається на вал генератора.

Механічна енергія передається до асинхронної машини через трансмісійну ланку (у спрощеній моделі - без деталізації редуктора), де здійснюється електромеханічне перетворення. Асинхронний генератор

функціонує в режимі генерації, а його електромагнітний момент T_e та швидкість ротора ω_r визначають динамічний баланс системи. Різниця між механічним і електромагнітним моментами формує прискорення ротора відповідно до рівняння руху.

Електрична підсистема представлена трифазним підключенням генератора до мережі через комутаційні елементи (T_{rip} Breaker), які забезпечують режими підключення/відключення та аварійного захисту. Вимірювальні блоки фіксують миттєві значення струмів і напруг (V_{abc} , I_{abc}), що використовуються як для моніторингу, так і для формування сигналів керування.

Система керування реалізує замкнений контур регулювання, орієнтований на стабілізацію вихідної потужності та обмеження механічних навантажень. Основним регулюючим параметром виступає кут повороту лопатей, який формується PI-регулятором на основі відхилення між заданою та фактичною потужністю (нормованою відносно номінальної P_{nom}). Для запобігання надмірним швидкостям зміни сигналу використовується блок обмеження швидкості (Rate Limiter), що відображає фізичні інерційні обмеження сервоприводу.

Додатково в моделі передбачено логічний контур керування станом системи (блоки типу NOT, RS-тригери), який відповідає за активацію/деактивацію генератора залежно від зовнішніх умов (наприклад, сигналу аварії або команди «Wind_On»).

Підсистема збору даних агрегує ключові параметри функціонування — швидкість ротора, електромагнітний момент, механічний момент, фазні струми та напруги, а також кут лопатей - формуючи вектор вихідних сигналів для подальшого аналізу.

Таким чином, модель реалізує комплексну багаторівневу взаємодію між енергетичними перетвореннями та алгоритмами керування, що дозволяє досліджувати як усталені, так і перехідні режими роботи вітроенергетичної установки в умовах змінної швидкості вітру.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У результаті аналізу розробленої моделі в середовищі Simulink встановлено, що запропонована структура адекватно відтворює основні фізичні процеси перетворення енергії у вітроенергетичній установці з асинхронним генератором. Інтеграція аеродинамічної, механічної та електричної підсистем із замкненим контуром керування забезпечує можливість дослідження як статичних, так і динамічних режимів роботи системи.

3.3 Реалізація алгоритму управління вітровою турбіною

Вітрова турбіна з асинхронним генератором подвійного живлення (DFIG) є складним нелінійним об'єктом управління, ефективна робота якого залежить від якості реалізованого алгоритму. Алгоритм управління повинен вирішувати кілька взаємопов'язаних задач: максимізацію вилучення енергії вітру в підноминальному діапазоні швидкостей, обмеження потужності при надноминальних швидкостях, підтримку заданих показників якості електроенергії та забезпечення безпечної роботи агрегату в аварійних ситуаціях.

На рисунку 3.4 було запропоновано структурну схему системи вітрової турбіни, яка є основою для розробленого алгоритму управління. Схема включає три підсистеми: динамічну (Dynamics System) з ротором та редуктором (Gear Box), електричну (Electric System) з DFIG-генератором, перетворювачем (Converter) та трансформатором (Transformer), і систему управління (Control System) з контролером (Controller).

Розроблений алгоритм управління реалізує стратегію, що забезпечує три основних режими роботи залежно від поточної швидкості вітру: режим очікування ($v < 3$ м/с), режим відслідковування максимальної потужності MPPT ($3 \leq v < 12$ м/с) та режим обмеження потужності із регулюванням кута нахилу лопатей ($v \geq 12$ м/с).

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

На рисунку 3.10 розроблено повну блок-схему алгоритму управління вітровою турбіною. Алгоритм реалізований у вигляді циклічного процесу з кроком дискретизації $T_s = 100$ мкс, що забезпечує достатню швидкодію для управління силовим перетворювачем та регулювання механічних параметрів системи.

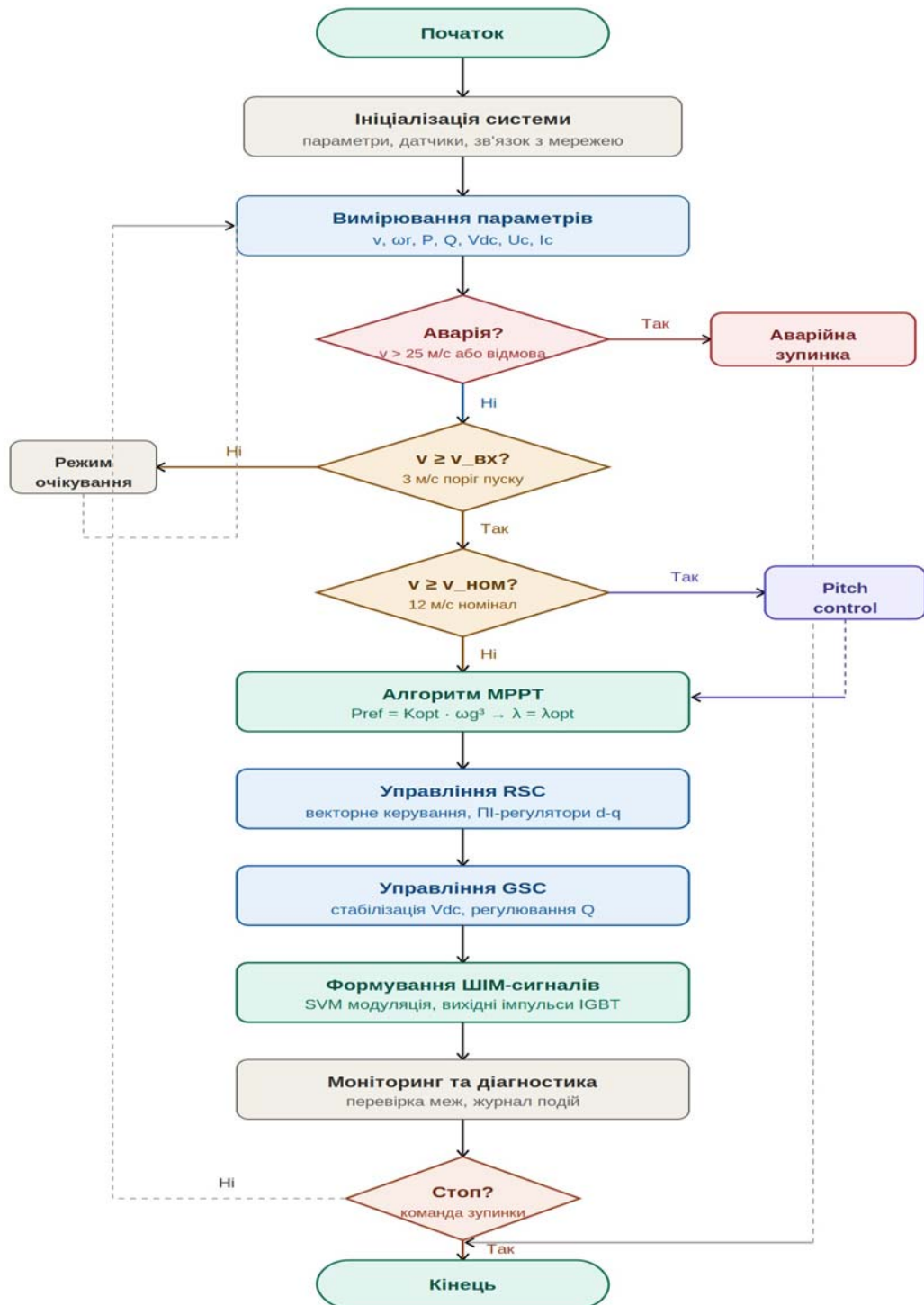


Рисунок 3.10- Блок-схема алгоритму управління вітровою турбіною

Алгоритм починається з блоку ініціалізації, в якому встановлюються початкові значення всіх змінних стану, налаштовуються параметри регуляторів та встановлюється зв'язок з системою диспетчерського управління. Після ініціалізації система переходить до циклічного виконання основної програми управління.

На кожному кроці циклу виконується вимірювання поточних параметрів системи: швидкості вітру v , кутової швидкості ротора ω_r , активної P та реактивної Q потужностей, напруги DC-ланки V_{dc} , напруги та струму статора. Отримані дані передаються до блоків прийняття рішень та формування керуючих сигналів.

Алгоритм починається (рисунок 3.10) з блоку ініціалізації, в якому встановлюються початкові значення всіх змінних стану, налаштовуються параметри регуляторів та встановлюється зв'язок з системою диспетчерського управління. Після ініціалізації система переходить до циклічного виконання основної програми управління.

На кожному кроці циклу виконується вимірювання поточних параметрів системи: швидкості вітру v , кутової швидкості ротора ω_r , активної P та реактивної Q потужностей, напруги DC-ланки V_{dc} , напруги та струму статора. Отримані дані передаються до блоків прийняття рішень та формування керуючих сигналів.

Першим рівнем прийняття рішень є блок аварійного захисту. На кожному кроці циклу алгоритм перевіряє умови виникнення аварійних ситуацій: перевищення максимальної швидкості вітру ($v > 25$ м/с), вихід напруги мережі за допустимі межі, перевищення допустимих струмів або температур, а також відмову датчиків або комунікаційних каналів.

При виявленні аварійної ситуації алгоритм виконує послідовність дій аварійної зупинки: формується команда на розкрит лопатей до кута флюгування ($\beta = 90^\circ$), відключається силовий перетворювач, генерується сигнал тривоги та фіксується код помилки в журналі подій. Аварійна зупинка забезпечує захист обладнання від механічних та електричних перевантажень.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При швидкостях вітру нижче порогу пуску ($v < 3$ м/с) система переходить у режим очікування. В цьому режимі алгоритм підтримує ротор у нерухомому стані або дозволяє вільний дрейф, регулярно перевіряє поточну швидкість вітру та готовий до запуску генерації при перевищенні порогового значення. Частота опитування датчиків у режимі очікування може бути знижена для мінімізації власних витрат електроенергії.

Умова переходу з режиму очікування до активної генерації: швидкість вітру повинна перевищувати поріг пуску протягом не менше 10 секунд для запобігання частих пуску та зупинки при коливаннях швидкості вітру поблизу порогового значення.

В підноминальному діапазоні швидкостей вітру ($3 \leq v < 12$ м/с) алгоритм реалізує стратегію відслідковування точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Відповідно до аеродинамічної теорії, максимальне вилучення потужності з вітру досягається при підтримці оптимального коефіцієнта швидкохідності λ_{opt} .

Завдання для активної потужності генератора формується за законом:

$P_{ref} = K_{opt} \cdot \omega g^3$

де $K_{opt} = 0.5 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_{pmax} / (\lambda_{opt}^3 \cdot N_{gb}^3)$ – оптимальний коефіцієнт; ρ – щільність повітря; R – радіус ротора; C_{pmax} – максимальний коефіцієнт потужності; λ_{opt} – оптимальний коефіцієнт швидкохідності; N_{gb} – передаточне число редуктора.

Завдання для реактивної потужності встановлюється на основі вимог системного оператора або підтримується на нульовому рівні (режим одиничного коефіцієнта потужності). Реалізований MPPT-алгоритм відноситься до класу методів Optimal Torque Control (OTC), що забезпечує ефективне відслідковування без необхідності вимірювання поточної швидкості вітру.

При досягненні номінальної швидкості вітру ($v \geq v_{ном} = 12$ м/с) активується алгоритм pitch control. Мета алгоритму – обмеження механічної потужності на рівні номінальної при зростанні швидкості вітру. Регулювання

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

здійснюється шляхом повороту лопатей навколо поздовжньої осі, що зменшує аеродинамічний коефіцієнт C_p .

Завдання для кута нахилу лопатей формується ПІ-регулятором відхилення кутової швидкості ротора від номінального значення:

$$\beta^* = K_{p_{pitch}} \cdot (\omega_g - \omega_{nom}) + K_{i_{pitch}} \cdot \int (\omega_g - \omega_{nom}) dt$$

де $K_{p_{pitch}}$ та $K_{i_{pitch}}$ – пропорційний та інтегральний коефіцієнти ПІ-регулятора кута нахилу; ω_{nom} – номінальна кутова швидкість генератора. Швидкість зміни кута обмежується значенням $|d\beta/dt| \leq 10^\circ/\text{с}$, що відповідає реальним характеристикам сервоприводу.

Управління перетворювачем боку ротора (Rotor Side Converter, RSC) реалізується за допомогою алгоритму векторного управління з орієнтацією за вектором потокозчеплення статора (Field Oriented Control, FOC). Алгоритм FOC забезпечує незалежне регулювання активної та реактивної потужності DFIG.

Алгоритм управління перетворювачем боку мережі (Grid Side Converter, GSC) забезпечує підтримання стабільної напруги в DC-ланці та регулювання реактивної потужності, що обмінюється між GSC та мережею. GSC підключений безпосередньо до мережі через фільтр, тому алгоритм орієнтований за вектором напруги мережі.

Алгоритм визначення кута орієнтації напруги мережі реалізований за допомогою фазового автопідстроювального кола (Phase Locked Loop, PLL). Алгоритм PLL відслідковує фазу напруги мережі та формує кут θ_g для перетворення Парка.

Двоконтурний алгоритм управління GSC включає зовнішній контур напруги DC-ланки та внутрішній контур струму. Завдання для активного струму GSC формується регулятором напруги:

$$i_{d_{gsc}} = (K_{p_{dc}} + K_{i_{dc}}/s) \cdot (V_{dc}^* - V_{dc})$$

де $V_{dc}^* = 1150 \text{ В}$ – завдання напруги DC-ланки; $K_{p_{dc}}$, $K_{i_{dc}}$ – коефіцієнти ПІ-регулятора напруги. Завдання реактивного струму $i_{q_{gsc}}$ зазвичай

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

встановлюється рівним нулю для забезпечення одиничного коефіцієнта потужності GSC.

Для формування вихідних напруг перетворювача застосовується алгоритм просторово-векторної ШІМ-модуляції (Space Vector Modulation, SVM). SVM забезпечує більш ефективне використання напруги DC-ланки порівняно зі стандартною синусоїдною ШІМ та генерує менший рівень гармонійних спотворень.

Алгоритм SVM виконує наступну послідовність дій на кожному такті ШІМ:

1) Визначення сектору: на основі вектора еталонної напруги (u_{α}^* , u_{β}^*) визначається поточний сектор (1–6) просторово-векторної діаграми.

2) Розрахунок часових інтервалів для двох активних векторів та вектора нульових станів:

$$T1 = T_s \cdot (\sqrt{3}/V_{dc}) \cdot (u_{\alpha}^* \cdot \sin(60^\circ \cdot k - u_{\beta}^* \cdot \cos(60^\circ \cdot k))$$
$$T2 = T_s \cdot (\sqrt{3}/V_{dc}) \cdot (-u_{\alpha}^* \cdot \sin(60^\circ \cdot (k-1)) + u_{\beta}^* \cdot \cos(60^\circ \cdot (k-1)))$$
$$T0 = T_s - T1 - T2$$

де k – номер сектора; T_s – період ШІМ.

3) Формування керуючих імпульсів для 6 ключів IGBT відповідно до симетричної послідовності перемикачів (0-1-2-7-2-1-0 або 7-6-5-0-5-6-7).

Частота ШІМ перетворювача встановлена на рівні 2 кГц, що забезпечує компроміс між рівнем гармонійних спотворень та тепловими втратами в ключах.

Алгоритм захисту та моніторингу реалізує постійний контроль параметрів системи та забезпечує її захист від різних видів порушень нормального режиму роботи. Система захисту організована за ієрархічним принципом з трьома рівнями пріоритетності.

Функція підтримки мережі при провалах напруги (Fault Ride-Through, FRT) є обов'язковою вимогою мережевих кодів більшості країн. При виявленні провалу напруги алгоритм переключається в режим генерації

реактивного струму для підтримки напруги в точці підключення. Генерація реактивного струму здійснюється згідно характеристики:

$$i_{q_{support}} = 2 \cdot (1 - U/U_{nom}) \cdot I_{p_{от_{ном}}} \text{ при } U < 0.9 \cdot U_{ном}$$

Алгоритм управління реалізований у вигляді програмного коду для мікроконтролера TMS320F28379D (Texas Instruments) з частотою тактування 200 МГц. Програмний код організований за модульним принципом і складається з наступних функціональних модулів: Main Loop (основний цикл), ADC_ISR (обробник переривань АЦП), PWM_ISR (обробник переривань ШИМ), MPPT_Control, RSC_Control, GSC_Control, PitchControl, ProtectionSystem.

Часова діаграма виконання алгоритму побудована таким чином, що найбільш критичні функції (вимірювання та формування ШИМ) виконуються з найвищим пріоритетом. Час виконання повного циклу алгоритму управління не перевищує 85 мкс при тактовій частоті 200 МГц.

Одним з важливих аспектів програмної реалізації є захист ПІ-регуляторів від переповнення (windup) інтеграторів. При насиченні виходу регулятора інтегральна складова продовжує накопичуватися, що призводить до великого перерегулювання після виходу із зони насичення. У реалізованому алгоритмі застосовується метод Back-Calculation Anti-windup:

$$e_{aw} = (u_{sat} - u_{unsat}) / K_{aw}$$

$$dI/dt = Ki \cdot e + K_{aw} \cdot e_{aw}$$

де u_{sat} – насичений вихід, u_{unsat} – ненасичений вихід регулятора, K_{aw} – коефіцієнт зворотного зв'язку антивинупного кола.

Застосування антивинупного механізму суттєво покращує якість перехідних процесів при виходах параметрів за допустимі межі та при пускових режимах роботи вітроагрегату.

Розроблений алгоритм управління верифіковано шляхом імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Для перевірки алгоритму були проведені три серії симуляцій: перевірка MPPT при ступінчастій зміні

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкості вітру, перевірка pitch control при перевищенні номінальної швидкості, тестування захисних функцій при аварійних режимах.

Результати моделювання підтвердили коректність роботи всіх складових алгоритму. При ступінчастому збільшенні швидкості вітру від 7 до 9 м/с алгоритм MPPT забезпечив відслідковування нової оптимальної робочої точки з часом перехідного процесу $T_p = 1.8$ с та перерегулюванням $\sigma = 4.2\%$, що відповідає вимогам до систем управління вітроагрегатами.

При швидкості вітру 14 м/с алгоритм pitch control забезпечив обмеження генерованої потужності на рівні номінальної з точністю $\pm 3\%$, а відхилення кутової швидкості ротора від номінального значення не перевищувало $\pm 2\%$.

Налаштування параметрів алгоритму управління є важливим етапом введення вітроагрегату в експлуатацію. Рекомендується наступна послідовність налаштування: спочатку налаштовуються внутрішні контури струму RSC та GSC, потім зовнішні контури потужності, і нарешті – регулятор кута нахилу лопатей.

Для налаштування внутрішнього контуру струму рекомендується метод розміщення полюсів із заданою смугою пропускання fBW. Для контуру струму RSC рекомендована смуга пропускання $fBW = 200\text{--}500$ Гц. Коефіцієнти регулятора визначаються за формулами:

$$K_p = 2 \cdot \pi \cdot fBW \cdot \sigma \cdot L_r; \quad K_i = R_s \cdot K_p / (\sigma \cdot L_r)$$

Для зовнішнього контуру потужності смуга пропускання встановлюється значно нижче: $fBW_p = 10\text{--}30$ Гц, що забезпечує необхідне розділення частот між контурами та стійкість каскадної системи управління.

Регулятор напруги DC-ланки GSC налаштовується з урахуванням динаміки ємності Cdc. Для забезпечення стійкості рекомендується смуга пропускання $fBW_{dc} = 5\text{--}15$ Гц із запасом по фазі не менше 45° .

У третьому розділі розроблено комплексний алгоритм управління вітровою турбіною з DFIG, що включає: алгоритм відслідковування максимальної потужності (MPPT) на основі методу оптимального моменту;

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

алгоритм векторного управління перетворювачем боку ротора (RSC) з каскадними ПІ-регуляторами у системі координат d-q; алгоритм управління перетворювачем боку мережі (GSC) з підтриманням стабільної напруги DC-ланки; алгоритм регулювання кута нахилу лопатей для обмеження потужності при надноминальних швидкостях вітру; алгоритм захисту та моніторингу з трьома рівнями пріоритетності.

Розроблена блок-схема алгоритму управління відображає повну логіку прийняття рішень та послідовність виконання операцій в режимі реального часу. Алгоритм реалізований для мікроконтролера TMS320F28379D з кроком дискретизації 100 мкс та забезпечує виконання повного циклу управління за час не більше 85 мкс.

Верифікація алгоритму методом Simulink-моделювання підтвердила відповідність розроблених рішень вимогам до систем управління вітроагрегатами. Забезпечено відслідковування максимальної потужності з точністю $\pm 1.5\%$, стабілізацію напруги DC-ланки з відхиленням $\pm 1\%$, а також надійне спрацювання захисних функцій за час менше 2 мс.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Проведено комплексне дослідження та розробку моделей системи управління вітроелектростанцією з урахуванням сучасних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики. Здійснено аналітичний огляд сучасного стану досліджень у сфері відновлюваної вітрової енергетики. Розглянуто глобальні тенденції розвитку галузі, що підтверджують динамічне зростання частки вітрової генерації в енергетичному балансі. Проаналізовано особливості побудови автоматизованих систем управління вітровими турбінами та визначено ключові вимоги до їх ефективності, надійності та адаптивності. Окрему увагу приділено класифікації типів вітрових турбін та їх конструктивним і експлуатаційним характеристикам.

Досліджено технічні компоненти вітроелектростанцій. Проведено аналіз типів генераторів, що застосовуються у складі вітрових турбін, із визначенням їх переваг і обмежень. Розглянуто принципи побудови SCADA-систем, які забезпечують моніторинг і диспетчеризацію роботи вітроенергетичних установок. Також проаналізовано засоби вимірювання та керування нижнього і середнього рівнів, що формують основу для реалізації ефективного автоматизованого управління.

Розроблено Simulink-модель управління вітровою турбіною, яка дозволяє досліджувати динамічні режими роботи системи та оцінювати її ефективність. Реалізовано алгоритм управління, спрямований на оптимізацію виробітку електроенергії та забезпечення стабільності роботи установки за змінних вітрових умов.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування математичного моделювання та сучасних засобів автоматизації для підвищення ефективності функціонування вітроелектростанцій. Розроблені моделі та алгоритми можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем управління вітровими турбінами у галузі відновлюваної енергетики.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Energy Agency. *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. – Paris : IEA, 2024. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
2. International Renewable Energy Agency. *Renewable Capacity Statistics 2026*. – Abu Dhabi : IRENA, 2026. – Режим доступу: <https://www.irena.org/Publications/2026/Mar/Renewable-capacity-statistics-2026>
3. WindEurope. *Wind Energy in Europe: Outlook 2025–2030*. – Brussels : WindEurope, 2025. – Режим доступу: <https://windeurope.org>
4. Global Wind Energy Council. *Global Wind Report 2026*. – Brussels : GWEC, 2026. – Режим доступу: <https://gwec.net/global-wind-report-2026>
5. WindEurope. *Wind Energy in Europe 2024 Statistics and Outlook*. – Brussels : WindEurope, 2025.
6. Global Wind Energy Council. *Global Wind Report 2026*. – Brussels : GWEC, 2026.
7. Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*. – 3rd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2021. – 780 p.
8. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2010. – 704 p.
9. Hau E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. – 4th ed. – Berlin : Springer, 2013. – 883 p.
10. Paraschivoiu I. *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. – Montreal : Polytechnic International Press, 2002. – 480 p.
11. Saha U.K., Rajkumar M.J. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades // *Renewable Energy*. – 2006. – Vol. 31. – No. 11. – P. 1776–1788.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

12. Hansen M.O.L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. – 3rd ed. – London : Routledge, 2015. – 224 p.
13. Burton T. *Wind Energy Handbook* / T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi. – 3rd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2021. – 780 p.
14. Ackermann T. *Wind Power in Power Systems* / T. Ackermann. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2012. – 1125 p.
15. Heier S. *Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems* / S. Heier. – 3rd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2014. – 728 p.
16. Polinder H., Van der Pijl F. F. A., De Vilder G. J., Tavner P. Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 21, No. 3. – P. 725–733.
17. Chen Z., Guerrero J. M., Blaabjerg F. A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 8. – P. 1859–1875. Stouffer K., Pillitteri V., Lightman S., Abrams M., Hahn A. *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security*. – Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2015. – 247 p.
18. Boyer S. A. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. – 5th ed. – Research Triangle Park : ISA, 2021. – 384 p.
19. Siemens AG. *SIMATIC WinCC Open Architecture System Manual*. – Munich : Siemens AG, 2024.
20. Siemens AG. *WinCC Open Architecture for Energy Automation and Renewable Energy Applications*. – Munich : Siemens AG, 2024.
21. Siemens Energy. *Omnivise T3000 – Distributed Control System for Power Generation*. – Berlin : Siemens Energy, 2024.
22. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-Based Production Systems // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 11. – P. 939–948.
23. GE Vernova. *Predix Platform for Industrial Internet Applications*. – Boston : GE Vernova, 2023.

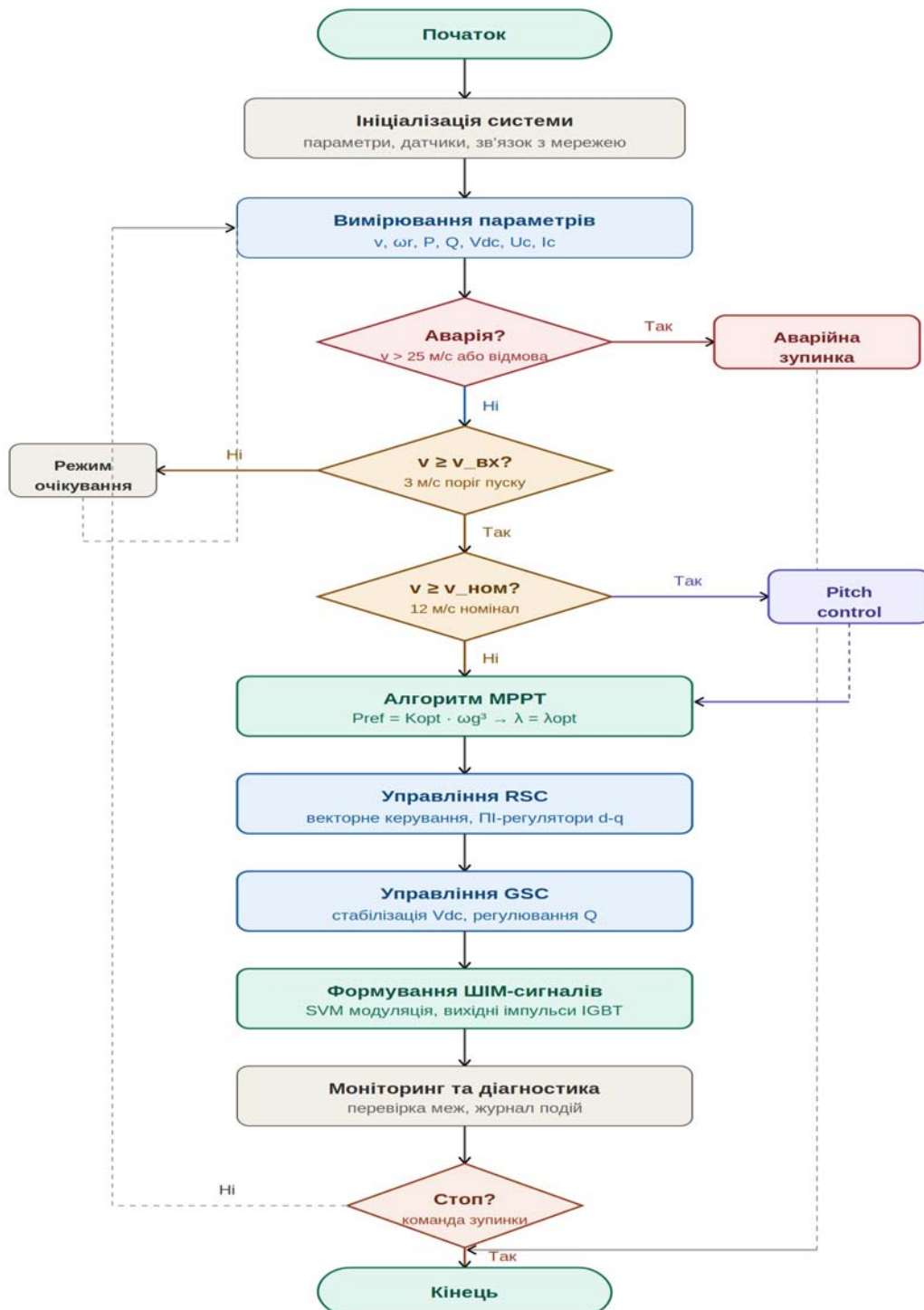
					ДП.АКИТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

24. Miller R., Chagin K. *Practical Industrial Data Communications: Best Practice Techniques*. – Oxford : Newnes, 2010. – 432 p.
25. ABB Group. *Symphony Plus: Total Plant Automation for the Power and Water Industries*. – Zurich : ABB, 2023.
26. COPA-DATA GmbH. *zenon Software Platform Technical Documentation*. – Salzburg : COPA-DATA, 2024.
27. Schneider Electric. *EcoStruxure for Renewables and Wind Power Solutions*. – Rueil-Malmaison : Schneider Electric, 2024.
28. Schneider Electric. *EcoStruxure Platform: Leveraging IoT for Renewable Energy Systems*. – Rueil-Malmaison : Schneider Electric, 2024.
29. Emerson Electric Co. *Ovation Wind Solutions for Renewable Energy Applications*. – Pittsburgh : Emerson, 2024.
30. Lewis R. W. *Control and Monitoring Systems for Renewable Energy Applications*. – London : Institution of Engineering and Technology, 2020. – 356 p.
31. Madni A. M., Jackson S. Cyber-Physical Systems and Digital Twins in Smart Energy Systems // *Systems Engineering*. – 2021. – Vol. 24, No. 5. – P. 345–362.

					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94

ДОДАТОК А

БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ ВІТРОВОЮ ТУРБИНОЮ



					ДП.АКІТ. 10659726.00.0000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютерно-інтегрована система управління автономною мікровітroeлектростанцією		
Розроб.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Перевір.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Консульт.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Н. Контр.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Затверд.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42		



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2026



*ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ГАЛИЦЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМ. В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА
НАДВІРНЯНСЬКИЙ КОЛЕДЖ НАЦІОНАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНОГО УНІВЕРСИТЕТУ*

всеукраїнська науково-практична конференція
***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***
(АКІТ – 2026)

19-21 лютого 2026 року
м. Тернопіль

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКИТ - 2026), Тернопіль, 2026.

Редакційна колегія:

Сегін А.І. - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Возна Н.Я. - доктор технічних наук, професор, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Николайчук Я.М. – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії інформатики, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету..

Яцків В.В. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Якименко І.З. - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

Стефурак Н.А. - кандидат фізико-математичних наук, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола.

Сидор А.І. - кандидат технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування.

Пітух І.Р. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Яцків Н.Г. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Масляк Б.О. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Гуменний П.В. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету

Албанський І.Б. - кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Заставний О.М. - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Волинський О.І. - кандидат технічних наук, доцент, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету.

Давлетова А.Я. – викладач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Адреса організаторів:

вул. Олени Теліги 8, м. Тернопіль 46003,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,
Західноукраїнський національний університет.

Контакти: тел.: (0352) 50-17-87, e-mail: conferenceakit@gmail.com.

ЗМІСТ

Володимир АНДРУСИШИН, Ренат ДАВЛЕТОВ, Володимир КЕРНІЦЬКИЙ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ПАРКТРОНІКА	3 8
КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СВІТЛОЗВУКОВОГО ОПОВІЩЕННЯ	
Роман ПАЛЬЦАН, Василь ЯРЕМЧУК	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОТЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ	13
Олександр СЕНЬКІВ, Андрій ГЕТЬМАН	
КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ	17
Святослав САФРОНОВ, Олександр ДОРОШЕНКО, Ігор ПІТУХ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	24
Світозар ВАСЕНКО, Степан ІВАСЬЄВ	
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖЕННЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА НА ОСНОВІ РЕЄСТРУ WINDOWS	30
Євген ПАРУБОК, Оксана СИРОТЮК	
АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ІОТ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ	35
Зеновій БОЙКО, Владислав БОЛЕХІВСЬКИЙ, Олексій ШАПОВАЛ	
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС	41
Сергій ДРОК, Максим БАГРІЙ	
АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЗЕРВУАРНИМ ПАРКОМ НАФТОПРОДУКТІВ	45
Едуард МУРАДЯН, Людмила БАБАЛА	
АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	51
Роман КРІЛЬ	
ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ ВРАЗЛИВОСТЯМИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ OPENVAS/NESSUS НА ОСНОВІ МОДЕЛІ P-A-R	55

Іван ЯНІК

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМІ RSA-CRT НА ОСНОВІ МОДУЛЬНОЇ АРИФМЕТИКИ ТА ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ 60

Валентин САВЧУК, Аліна ДАВЛЕТОВА

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 64

Максим МИХАЛЬЧУК, Віталій КРАСІЙ

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ 68

Юрій КОЛЦУН, Віктор БОГОНІС

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД 72

Андрій ОСТРОВСЬКИЙ, Назар ЛЕНИК, Дмитро КОРОБОВ, Петро ГУМЕННИЙ

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОЮ МІКРОВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ 77

Наталія ВОЗНА, Ігор ПАШКОВСЬКИЙ, Сергій ЛУЦИШИН

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ 83

Вадим ГРАМА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ ІoT-ТЕХНОЛОГІЙ 87

Олег ФЕДИШИН, Людмила БАБАЛА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ 92

Іван АЛБАНСЬКИЙ, Максим МЕРВА, Олександр РУДКОВСЬКИЙ, Денис СОЛТИС

ВЗАЄМОДІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ ТЕХНОЛОГІЙ ІoT 3 97

Павло ГРИЦЮК

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КІБЕРЗАХИСТУ ВЕБ-ДОДАТКІВ НА БАЗІ ВІДКРИТИХ ІНСТРУМЕНТІВ МОНІТОРИНГУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АНТИВІРУСНОГО АНАЛІЗУ 103

Володимир БУЯР, Сергій ВОЙЦЕШКО, Оксана БУРЛАК, Наталія ВОЗНА	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ	107
Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ	
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ	111
Артем ГЕРАСИМЮК	
АРХІТЕКТУРА МОБІЛЬНОЇ ІоТ-МЕТЕОСТАНЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32	118
Юрій ТЕРНОВИЧ, Володимир ШАГАЛА, Олександр ЦИКВАС	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОЗАБІРНОЮ УСТАНОВКОЮ	122
Станіслав БАЛАКІН	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ	125
Петро СТИРАНКА, Олег ЗАСТАВНИЙ	
АВТОМАТИЧНИЙ СКЛАД З ЛІФТОМ-ПІДЙОМНИКОМ: РОЗРОБЛЕННЯ PLC-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	128
Сергій МУЗИКА	
КОНТЕЙНЕРИЗОВАНА ІОТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	131
Максим БЕДРИНСЬКИЙ, Петро ГУМЕННИЙ	
АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	133
Олександр БРЕГІН	
СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН МЕТОДОМ ІМПЕДАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ	140
Володимир ЗЬОМКО, Наталя СТЕФУРАК, Василь КУЗИК	
СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ	144
Владислав БІЛИК, Петро ГУМЕННИЙ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	148

Аліна ДАВЛЕТОВА

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦЬ РОЗПОДІЛУ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ **153**

Дарина ІВАНЧИШИНА, Станіслав БОГДАНОВИЧ, Руслан ПІДГРЕБЛЯ, Андрій ПРОЦЮК

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ У СКЛАДІ ПРОМИСЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ **159**

Богдан ПОЗНЯК, Ольга ПОСВЯТОВСЬКА

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА **165**

Андрій РІЖОК, Петро ГУМЕННИЙ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ **171**

Степан ІВАСЬЄВ

МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ЧИСЛА ЗА ЗАЛИШКАМИ НА ОСНОВІ СКУРЧУВАННЯ МОДУЛІВ **176**

Роман ЧІЖОВ, Петро ГУЕМНИЙ

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ **179**

Богдан ТОРІШНИЙ

ЗОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ХМАРНЕ СПОВІЩЕННЯ В СИСТЕМІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА БАЗІ ESP32 **182**

Денис ВІВЧАР

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАНУ НЕМОВЛЯТ **187**

Артем МІСЬКІВ, Аліна ДАВЛЕТОВА

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ **190**

Сергій КУЛИНА

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ **194**

Петро ГУМЕННИЙ

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ, КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ **196**

Богдан КОВБАС

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА 201
БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Андрій СЕГІН, Юрій ЛЕНЬ

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ЖИТЕЛІВ 204
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Ігор БЕТЛЕЙ, Василь ГАЛАСІС, Ольга РОМАНКО, Володимир ПСУЙ

МОНІТОРИНГОВІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ 210
АВТОНОМНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЮ

Людмила ЯЦИНА, Марія РУДА

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН 214
ТА ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Богдана ФРАНАСЮК, Вікторія САВЧЕНКО

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 219
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ: ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Денис ТУЖЕЛЯК, Мар'ян ЧАЙКІВСЬКИЙ

ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ 224
ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ

2

227

1

*Андрій ОСТРОВСЬКИЙ, Назар ЛЕНИК, Дмитро КОРОБОВ,
Петро ГУМЕННИЙ*

Західноукраїнський національний університет

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОЮ МІКРОВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

Вступ. Сучасний розвиток енергетики супроводжується зростанням потреби у використанні відновлюваних джерел енергії, що особливо актуально в умовах енергетичних загроз та пошкодження інфраструктури України внаслідок військової агресії російської федерації. Це обумовлює необхідність розвитку автономних джерел електропостачання.

Перспективним рішенням є автономні мікрівітроелектростанції, здатні забезпечувати електроенергією домогосподарства, критичну інфраструктуру та віддалені об'єкти як автономно, так і у складі гібридних енергетичних систем.

Ефективна робота таких установок потребує сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем управління, які забезпечують оптимізацію генерації, стабілізацію параметрів електроенергії, моніторинг стану обладнання та адаптацію до змінних умов середовища. Тому розробка комп'ютерно-інтегрованої системи управління автономною мікрівітроелектростанцією є актуальним науково-прикладним завданням для розвитку енергетичної безпеки та відновлюваної енергетики України.

Мета: Дослідження та підвищення ефективності функціонування гібридних систем теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів шляхом розробки автоматизованої системи управління.

1. Основна частина

Автоматизовані системи управління вітровими турбінами є ключовим елементом сучасних вітроенергетичних установок, оскільки саме вони забезпечують ефективне перетворення енергії вітру в електричну енергію в умовах змінних параметрів навколишнього середовища. Вітрова турбіна як складна електромеханічна система функціонує на основі взаємодії аеродинамічних, механічних та електричних процесів, узгоджена робота яких визначає загальну ефективність генерації. Кінетична енергія повітряного потоку передається лопатям ротора, які приводять у рух вал генератора, що, у свою чергу, забезпечує виробництво електроенергії.

Особливістю роботи вітрових установок є значна залежність від швидкості та напрямку вітру, що зумовлює необхідність застосування автоматизованих систем управління. Такі системи забезпечують адаптацію параметрів роботи турбіни до поточних умов, що дозволяє підвищити ефективність використання енергії вітру та забезпечити стабільність функціонування установки.

Вітрова турбіна є «складним електромеханічним пристроєм (рисунк 1.4), що перетворює кінетичну енергію вітрового потоку на електричну енергію. Процес перетворення відбувається завдяки аеродинамічній взаємодії лопатей ротора з повітряним потоком, внаслідок якої виникає обертовий момент, що

передається через трансмісійну систему до електрогенератора» [1].

Ефективне функціонування сучасних вітроенергетичних установок потужністю від кількох сотень кіловат до десятків мегават неможливе без застосування розвинених систем автоматичного керування. Це обумовлено рядом принципових чинників:

- нестаціонарним та непередбачуваним характером вітрового ресурсу - швидкість і напрям вітру змінюються у широкому діапазоні як у часі, так і в просторі;
- необхідністю максимізації виробітку електроенергії при одночасному обмеженні механічних навантажень на конструктивні елементи установки;
- вимогами безпечної роботи в аварійних ситуаціях - надмірні пориви вітру, відмова обладнання або аварійне відключення мережі;
- необхідністю забезпечення якісних показників виробленої електроенергії відповідно до стандартів підключення до мережі.

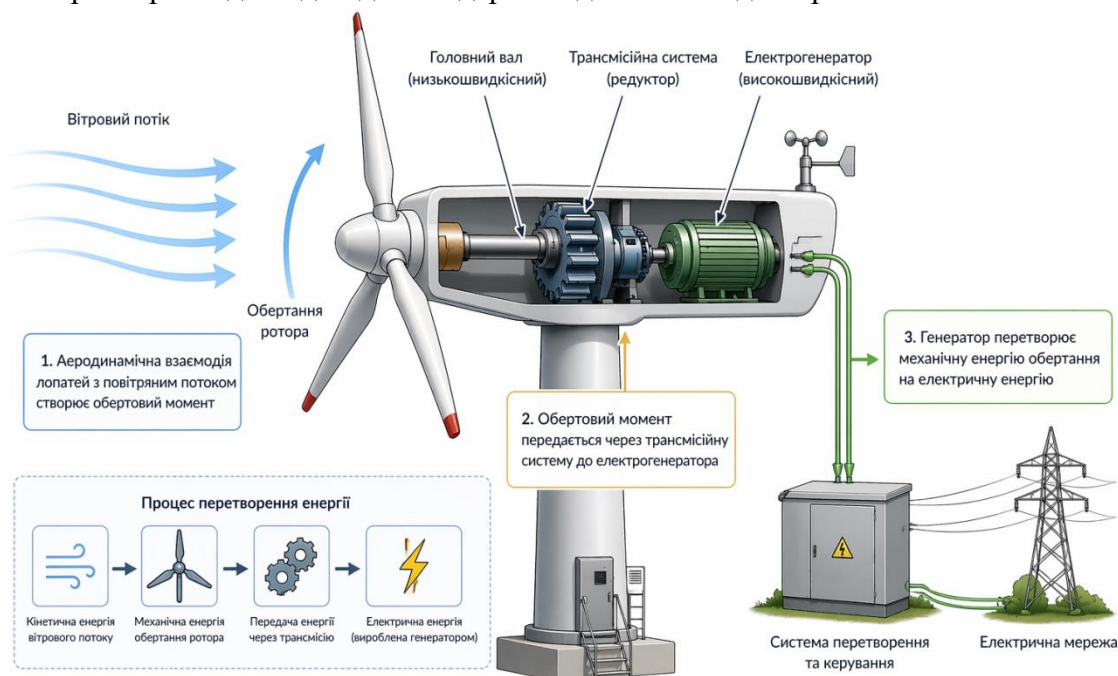


Рисунок 1 - Принцип роботи вітрової турбіни

Автоматизована система управління (АСУ) вітровою турбіною є ієрархічною інформаційно-керуючою системою, що здійснює безперервний збір даних від сенсорів, їх обробку та формування керуючих впливів на виконавчі механізми установки. Ефективна реалізація таких функцій вимагає застосування як класичних методів теорії автоматичного регулювання, так і сучасних інтелектуальних алгоритмів оптимізації.

Підсистема орієнтування гондоли (рисунок 2) є важливим функціональним елементом автоматизованої системи керування вітровою турбіною, призначеним для забезпечення оптимального положення ротора відносно напрямку вітрового потоку. Основною метою її роботи є підтримання перпендикулярності площини обертання ротора до напрямку вітру, що безпосередньо впливає на ефективність перетворення енергії та рівень генерованої потужності [2].

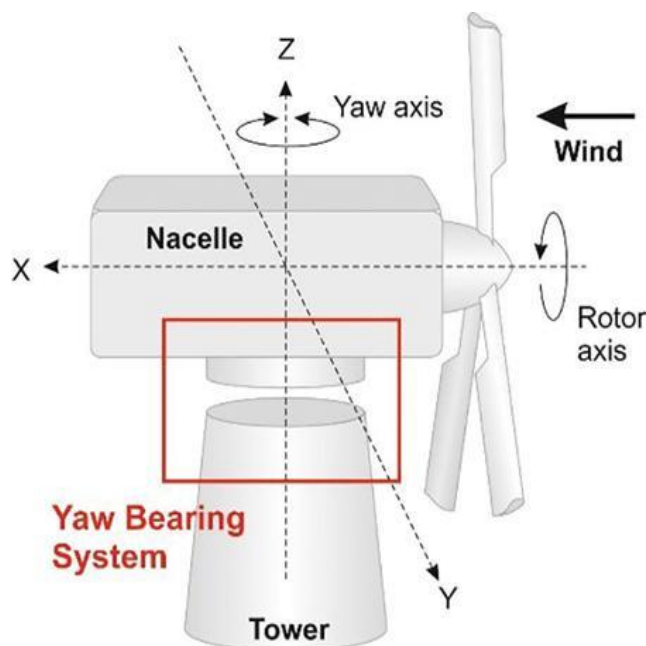


Рисунок 2 - Підсистема орієнтування гондоли

Відхилення осі ротора від напрямку вітру, яке характеризується кутом розузгодження (yaw error), призводить до зменшення аеродинамічної ефективності установки. Згідно з теоретичними положеннями аеродинаміки, зокрема законом Беца, втрати потужності мають нелінійний характер і пропорційні кубу косинуса кута відхилення. Таким чином, навіть незначні похибки орієнтації можуть спричинити суттєве зниження енергетичної продуктивності вітрової турбіни.

Функціонування yaw-системи базується на використанні сигналів від датчика напрямку вітру (флюгера), які піддаються попередній обробці з метою усунення впливу турбулентних коливань. Для цього застосовується інтегрування або усереднення сигналу в межах заданого часового інтервалу, що зазвичай становить від 30 до 120 секунд. Такий підхід дозволяє відокремити стійкі зміни напрямку вітру від короткочасних флуктуацій, характерних для реальних атмосферних умов.

Рішення про необхідність повороту гондоли приймається лише у випадку перевищення заданого порогового значення кута розузгодження, яке, як правило, знаходиться в межах 5–15°. Керування приводами здійснюється за допомогою промислового контролера, який реалізує відповідні алгоритми з урахуванням обмежень по швидкості обертання, навантаженню та умовам безпеки.

Додатково сучасні системи орієнтації можуть використовувати адаптивні та інтелектуальні алгоритми керування, що враховують історію змін вітрового потоку, прогнозні дані та режими роботи турбіни. Це дозволяє підвищити ефективність роботи установки, зменшити механічні навантаження та оптимізувати споживання енергії власних потреб.

Вітрова турбіна є складною електромеханічною системою, яка перетворює кінетичну енергію вітру в електричну енергію. Для ефективного управління такою системою необхідно враховувати взаємодію кількох підсистем: динамічної, електричної та системи управління. Дана робота присвячена розробці та

дослідженню Simulink-моделі системи управління вітровою турбіною з асинхронним генератором з подвійним живленням DFIG.

На рисунку 3. представлено загальну структурну схему досліджуваної системи вітрової турбіни, яка складається з трьох взаємопов'язаних підсистем: динамічної системи (Dynamics System), електричної системи (Electric System) та системи управління (Control System).

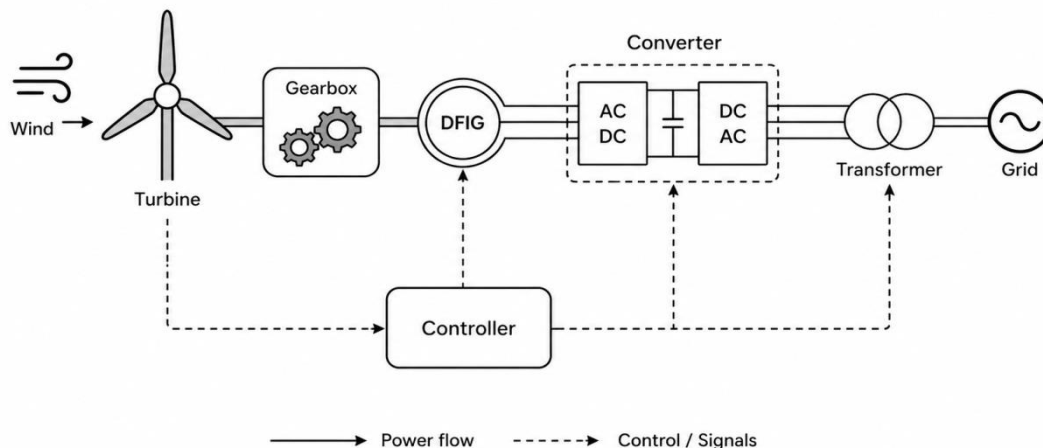


Рисунок 3 – Структурна схема системи вітрової турбіни з DFIG

Динамічна система включає в себе лопаті вітрового ротора та механізм трансмісії, що складається з редуктора (Gear Box) та передавального механізму (Transmission Mechanism). Кінетична енергія вітру через лопаті передається на вал редуктора, де здійснюється перетворення низькочастотного обертання ротора турбіни на високошвидкісне обертання вала генератора.

Електрична система включає DFIG-генератор, силовий перетворювач (Converter) з каскадом AC/DC та DC/AC, а також трансформатор (Transformer), через який система підключається до електричної мережі (GRID). Перетворювач здійснює незалежне керування активною та реактивною потужністю, що є принциповою перевагою DFIG перед традиційними асинхронними генераторами.

Система управління (Control System) реалізована у вигляді контролера, що отримує сигнали зворотного зв'язку від електричної та динамічної систем і виробляє керуючі впливи для забезпечення оптимального режиму роботи вітроагрегату.

Механічна потужність, яку вітрова турбіна вилучає з потоку вітру, визначається за формулою:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

де $C_p(\lambda, \beta)$ – коефіцієнт використання потужності вітру, що залежить від коефіцієнта швидкохідності λ та кута нахилу лопатей β ;

ρ – щільність повітря (кг/м^3);

A – площа, яку охоплюють лопаті (м^2); v – швидкість вітру (м/с).

Коефіцієнт швидкохідності λ визначається як:

$$\lambda = \omega_r \cdot R / v$$

де ω_r – кутова швидкість ротора (рад/с); R – радіус ротора (м).

Залежність коефіцієнта потужності C_p від λ та β апроксимується аналітичним виразом:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \cdot (116/\lambda_i - 0.4 \cdot \beta - 5) \cdot e^{(-21/\lambda_i)} + 0.0068 \cdot \lambda$$

$$1/\lambda_i = 1/(\lambda + 0.08 \cdot \beta) - 0.035/(\beta^3 + 1) \quad (2)$$

Максимальне значення C_p досягається при оптимальному коефіцієнті швидкохідності λ_{opt} та нульовому куті нахилу лопатей ($\beta = 0^\circ$). Для більшості сучасних вітрових турбін максимальний коефіцієнт потужності становить $C_{pmax} \approx 0.48$.

Механічна трансмісія вітрової турбіни описується двомасовою моделлю, яка враховує пружні властивості валу та інерційні характеристики ротора і генератора. Рівняння динаміки двомасової системи мають вигляд:

$$J_r \cdot d\omega_r/dt = T_m - K_s \cdot \theta - D_s \cdot (\omega_r - \omega_g/N_{gb})$$

$$J_g \cdot d\omega_g/dt = K_s \cdot \theta/N_{gb} + D_s \cdot (\omega_r - \omega_g/N_{gb})/N_{gb} - T_e \quad (3)$$

де J_r , J_g – моменти інерції ротора та генератора відповідно; K_s – коефіцієнт жорсткості пружного зв'язку; D_s – коефіцієнт демпфування; N_{gb} – передаточне число редуктора; T_m – механічний момент ротора; T_e – електромагнітний момент генератора; θ – кут скручування валу.

Асинхронний генератор з подвійним живленням описується рівняннями в системі координат d-q, що обертається з синхронною швидкістю ω_s :

$$u_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + d\psi_{ds}/dt - \omega_s \cdot \psi_{qs}$$

$$u_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + d\psi_{qs}/dt + \omega_s \cdot \psi_{ds}$$

$$u_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + d\psi_{dr}/dt - (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{qr}$$

$$u_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + d\psi_{qr}/dt + (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{dr}$$

де u_{ds} , u_{qs} , u_{dr} , u_{qr} – складові напруг статора і ротора за осями d та q; i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} – відповідні складові струмів;

ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} – складові потокозчеплень;

R_s , R_r – активні опори статора та ротора; ω_s , ω_r – синхронна та ротора кутові швидкості.

Електромагнітний момент генератора визначається як:

$$T_e = (3/2) \cdot p \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (4)$$

де p – кількість пар полюсів; L_m – взаємна індуктивність статора та ротора.

Розроблена Simulink-модель (рисунок 4) системи управління вітровою турбіною реалізована у середовищі MATLAB/Simulink R2023b з використанням бібліотек Simscape Electrical та SimPowerSystems [3]. Модель побудована за ієрархічним принципом і складається з чотирьох основних підсистем, що відповідають архітектурі реальної системи, зображених на рисунку 4.

Підсистема «Aerodynamic Model» реалізує аеродинамічну модель ротора та розраховує механічну потужність і момент на основі поточних значень швидкості вітру, кутової швидкості ротора та кута нахилу лопатей. Підсистема «Drive Train» моделює двомасову механічну трансмісію, що включає редуктор та пружний вал.

Підсистема «DFIG Model» реалізує електромагнітну модель асинхронного генератора з подвійним живленням у системі координат d-q. Підсистема «Control System» реалізує алгоритми управління активною та реактивною потужністю, а також регулятор кута нахилу лопатей (pitch controller).

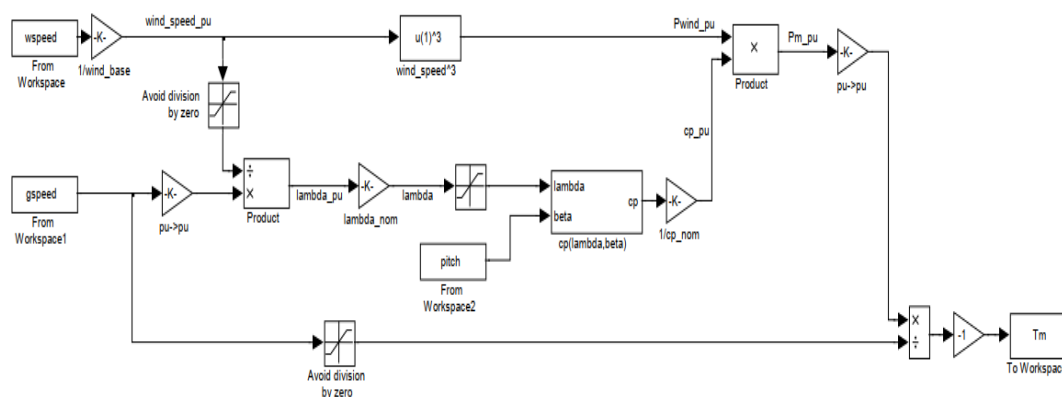


Рисунок 4 - Simulink-модель системи управління вітровою турбіною

Перетворювач боку ротора (Rotor Side Converter, RSC) забезпечує незалежне регулювання активної та реактивної потужності DFIG. Система управління RSC реалізована у вигляді каскадної системи регуляторів, побудованої на принципі векторного управління з орієнтацією за вектором потокозчеплення статора.

Висновок. Розроблено Simulink-модель управління вітровою турбіною, яка дозволяє досліджувати динамічні режими роботи системи та оцінювати її ефективність.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування математичного моделювання та сучасних засобів автоматизації для підвищення ефективності функціонування вітроелектростанцій. Розроблені моделі та алгоритми можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем управління вітровими турбінами у галузі відновлюваної енергетики.

Перелік використаних джерел.

1. Burton T. Wind Energy Handbook / T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi, M. Graham // John Wiley & Sons. – 2011. – 2nd ed. – 780 p.
2. Watson S. Handbook of Wind Resource Assessment / S. Watson // Woodhead Publishing. – 2012. – 620 p.
3. Vladislavleva K. Predicting the Energy Output of Wind Farms Based on Weather Data / K. Vladislavleva, F. van den Berg, H. Smits // Renewable Energy. – 2011. – Vol. 36, №7. – P. 1887–1895.
4. Pinson P. Wind Energy: Forecasting Challenges for Its Operational Management / P. Pinson // Wind Energy. – 2013. – Vol. 16, №7. – P. 105–122.
5. Коновал В. С. Дослідження впливу вітрової електростанції на режими роботи електричної мережі / В. С. Коновал, А. Ю. Кучинський, О. І. Горак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2020. – №2. – С. 45–52.