

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова
Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на тему «Модернізація вітрогенератора малої потужності на базі
синхронної машини»**

Здобувач Янчурський О.Г.

4 курсу групи АЕМ-40

Керівник: Шейда Голбад К.А. д.ф.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

В.о. завідувача кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії,
автоматизації, робототехніки та програмування ім. П. М. Платонова

Кафедра: автоматизація технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 141 – Електрична інженерія

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри Е та М
д.т.н, проф. Петро ОСАДЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА Янчурського Олександра Григоровича

1. Тема роботи: «Модернізація вітрогенератора малої потужності на базі синхронної машини»

Керівник роботи: Шейда Голбад Камбіз Ахмадович, д.ф.н., доцент.

2. Затверджено наказом ОНТУ № 58-03 від 30.01.26 р.

Строк подання студентом роботи 14.06.26р.

3. Вихідні дані до роботи: Вітрогенератор Aeolos-H 1KW.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Огляд літератури. Огляд існуючої конструкції. Аналіз недоліків обґрунтування методів модернізації. Розрахунок і підбір основних компонентів для проектованої системи. Вибір і обґрунтування комплектуючих для системи. Економічна частина. Вимоги безпеки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації. 1. Актуальність теми. 2. Карта розташування вітрогенераторів на території України. 3. Різновиди альтернативних джерел енергії. 4. Приклади діючих вітроенергетичних проєктів в Україні. 5. Конструкція промислової вітрової установки. 6. Види вертикальних вітрогенераторів. 7. Порівняльна оцінка технічних характеристик генераторів та обґрунтування вибору синхронної машини для вітроенергетичної установки. 8. Порівняння вітрогенераторів малої потужності на базі синхронної машини. 9. Силові розрахунки вітрогенераторної установки. 10. Технічні характеристики обраного для модернізації вітрогенератора AEOLUS-H 1KW. 11. Технічні дані активного випрямляча SKM25GD125D. 12. Технічні характеристики АКБ DYNESS B4850. 13. Технічні дані контролера заряду GreenChip W1500. 14. Технічні характеристики інвертора IPOWER 48–220 В 1500 Вт. 15. Загальна схема модернізованої вітроенергетичної установки на базі синхронного генератора з постійними магнітами. 16. Імітаційна модель вітрогенератора на базі

синхронної машини розроблена у програмі MATLAB/SIMULINK. 17. Внутрішня структура імітаційної моделі турбіни. 18. Економічне обґрунтування проекту. 19. Висновки

6. Консультанти розділів дипломної роботи

№ з/п	Розділ	Консультант	Підпис, дата	
			завдання видав	завдання прийняв
1	Аналіз літературних джерел	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н., доцент.		
2	Розрахунок і підбір основних компонентів проектованої системи	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н., доцент.		
3	Визначення параметрів апаратури управління	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н., доцент.		
4	Економічна обґрунтованість			
5	Охорона праці			

7. Дата видачі завдання: «02» лютого 2026 р.

Керівник _____ Шейда Голбад К.А.

Завдання прийняв до виконання _____ Янчурський О.Г.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ Актуальність теми. Мета і завдання роботи. Об'єкт і предмет дослідження.	10.02.2026.	
2	Огляд літератури і аналіз існуючих систем. Вибір об'єкта модернізації.	27.02.2026.	
4	Проектування системи. Розрахунок параметрів вітрогенератора, вибір апаратури керування.	20.03.2026.	
5	Розробка математичних моделей системи	14.04.2026	
6	Розрахунок економічної доцільності і ефективності.	08.05.2026	
7	Охорона праці та безпека життєдіяльності. Висновки роботи.	28.05.2026	
8	Перевірка роботи на доброчесність	12.06.2026	
9	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи	06.06.2026	
10	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Янчурський О.Г.

Керівник роботи _____ Шейда Голбад К.А.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних веб-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Янчурський О.Г.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена модернізації вітрогенератора малої потужності на базі синхронної машини з метою підвищення ефективності його роботи та покращення енергетичних характеристик. У роботі проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку малої вітроенергетики, розглянуто конструктивні особливості та принцип роботи синхронних генераторів у складі вітроенергетичних установок. Виконано дослідження режимів роботи вітрогенератора при змінній швидкості вітру та різних навантаженнях. Проведено математичне моделювання системи у середовищі MATLAB/Simulink. За результатами дослідження запропоновано технічні рішення щодо вдосконалення конструкції та режимів роботи вітрогенератора малої потужності, що забезпечують зменшення енергетичних втрат, підвищення коефіцієнта корисної дії та покращення якості виробленої електричної енергії. Результати роботи можуть бути використані при модернізації автономних вітроенергетичних установок малої потужності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вітрогенератор, синхронна машина, математичне моделювання, електромеханічні процеси.

ABSTRACT

The diploma thesis is devoted to the modernization of a low-power wind generator based on a synchronous machine in order to improve its operational efficiency and energy performance. The paper analyzes the current state and prospects for the development of small-scale wind power engineering, considers the design features and operating principles of synchronous generators as part of wind power installations. The operating modes of the wind generator under variable wind speed and different load conditions are investigated.

Mathematical modeling of the system was carried out in the MATLAB/Simulink environment. Based on the research results, technical solutions for improving the design and operating modes of the low-power wind generator were proposed, providing reduction of energy losses, increase in efficiency, and improvement of the quality of generated electrical energy.

The results of the work can be used in the modernization of autonomous low-power wind energy systems.

KEYWORDS: wind generator, synchronous machine, mathematical modeling, electromechanical processes.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	9
1.1. Перспективи розвитку вітроенергетики.....	9
1.2. Конструкція вітрогенераторних установок.....	13
1.3 Принцип роботи вітрогенераторної установки.....	19
1.4. Порівняння вітрогенераторів на базі асинхронної машини та синхронної машини з постійними магнітами.....	23
1.5 Варіанти конфігурації систем.....	27
РОЗДІЛ 2. ВІБІР ВІТРОГЕНЕРАТОРА.....	29
2.1 Визначення потужності вітрогенератора.....	29
2.2 Вибір об'єкта модернізації	33
2.3 Аналіз недоліків базової конструкції вітрогенератора.....	35
2.4 Розрахунок силового перетворювача.....	39
2.5 Розрахунок акумуляторної батареї.....	42
2.6 Контролер заряду акумуляторної батареї.....	44
2.7 Вибір інвертора.....	45
2.8 Розрахунок параметрів регулятора напруги DC-шини та ємності конденсатора DC-шини.....	47
2.9 Вибір апаратів захисту кола постійного струму.....	50
2.10 Підсумок модернізації вітроенергетичної установки на базі синхронної машини.....	51
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	54
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ.....	58
4.1 Загальні інвестиції.....	58
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	59
4.3 Втрати електричної енергії в системі.....	60
4.4 Підвищення надійності електропостачання за рахунок акумуляторної батареї.....	62

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	
ВІТРОГЕНЕРАТОРА.....	64
5.1 Основні небезпечні фактори.....	64
5.2 Заходи електробезпеки.....	64
5.3 Механічна безпека.....	66
5.4 Безпека під час технічного обслуговування.....	68
5.5 Пожежна та аварійна безпека.....	69
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	73

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним переходом до використання відновлюваних джерел енергії, що зумовлено зростанням вартості традиційних енергоресурсів, необхідністю зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та підвищенням рівня енергетичної незалежності. Одним із найбільш перспективних напрямків альтернативної енергетики є вітроенергетика, яка дозволяє ефективно використовувати енергію вітру для виробництва електричної енергії. Особливу актуальність мають вітрогенератори малої потужності, які можуть застосовуватись для автономного або резервного електропостачання приватних будинків, фермерських господарств, невеликих підприємств та віддалених об'єктів. Перевагами таких установок є відносна простота конструкції, можливість роботи у віддалених районах та зниження залежності від централізованих електромереж.

Одним із основних елементів вітроенергетичної установки є електрична машина, що перетворює механічну енергію обертання у електричну. Значне поширення у вітроенергаторах малої потужності отримали синхронні машини завдяки їх високому коефіцієнту корисної дії, стабільності вихідних параметрів та можливості роботи при змінній швидкості обертання. Проте існуючі конструкції малопотужних вітрогенераторів часто мають недостатню ефективність, підвищені втрати енергії та обмежені можливості адаптації до змін швидкості вітру, що потребує проведення модернізації.

Актуальність теми. Модернізація вітрогенератора малої потужності на базі синхронної машини дозволяє підвищити ефективність роботи установки, покращити якість генерованої електроенергії, зменшити механічні та електричні втрати, а також забезпечити більш стабільну роботу при змінних режимах навантаження та швидкості вітру.

Об'єктом дослідження є вітроенергетична установка малої потужності на базі синхронної машини.

Предметом дослідження є процес модернізації вітрогенератора на базі синхронної машини та аналіз його електромеханічних характеристик.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися теоретичні, аналітичні та програмні методи дослідження. Для дослідження характеристик синхронної машини, аналізу електромеханічних процесів та оцінки ефективності модернізації використовувалися методи математичного моделювання. Математичні моделі системи були реалізовані у програмному середовищі MATLAB та його додатку Simulink, що дозволило виконати моделювання роботи вітрогенератора при різних режимах навантаження та змінній швидкості вітру. Для побудови електричних схем, дослідження перехідних процесів і аналізу параметрів системи застосовувалися засоби комп'ютерного моделювання та графічного аналізу.

Наукова та практична новизна отриманих результатів. Наукова новизна полягає у вдосконаленні підходів до модернізації вітрогенератора малої потужності на базі синхронної машини з метою підвищення ефективності його роботи при змінних режимах вітрового навантаження. У процесі виконання роботи запропоновано технічні рішення щодо модернізації системи генерування електроенергії, які забезпечують зменшення енергетичних втрат та покращення режимів роботи генератора.

отримано результати моделювання, що дозволяють оцінити ефективність модернізованої системи у різних експлуатаційних режимах. Практична новизна отриманих результатів полягає у можливості застосування запропонованих рішень для підвищення ефективності автономних вітроенергетичних установок малої потужності. Результати роботи можуть бути використані при проєктуванні автономних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Перспективи розвитку вітроенергетики

В останні роки в Україні спостерігається активний розвиток вітроенергетики, незважаючи на складну економічну та енергетичну ситуацію. Вітрова енергетика стала одним із ключових напрямів модернізації енергетичної системи держави та переходу до «зеленої» енергетики.

За даними Міністерства енергетики України, у 2025 році в країні було введено в експлуатацію понад 300 МВт нових вітроенергетичних потужностей.



Рис. 1.1 Вітрові станції України станом на кінець 2021 року

Це стало найбільшим приростом за останні роки та свідчить про активне відновлення галузі. У 2025–2026 роках в Україні одночасно реалізуються декілька масштабних проєктів будівництва нових вітрових електростанцій. За інформацією Української вітроенергетичної асоціації, у стадії будівництва перебувають сім нових вітроелектростанцій загальною потужністю близько 4 ГВт.

Основними регіонами розвитку вітроенергетики України є Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька область; узбережжя Чорного та Азовського морів.

Ці території характеризуються високим вітровим потенціалом, що забезпечує ефективну роботу вітрогенераторних установок.

Важливим фактором розвитку галузі є інтеграція української енергосистеми до європейської енергомережі ENTSO-E та впровадження сучасних технологій керування генерацією. Значна увага приділяється використанню систем накопичення енергії, цифрових систем моніторингу та перетворювачів частоти.

Сучасні тенденції розвитку вітроенергетики України передбачають:

- модернізацію існуючих вітроустановок;
- збільшення одиничної потужності турбін;
- використання синхронних генераторів із постійними магнітами;
- впровадження автоматизованих систем керування;
- розвиток локальної та автономної генерації.

Сучасний розвиток вітроенергетики обумовлений рядом факторів, серед яких основними є:

- зростання світового споживання електроенергії;
- обмеженість традиційних енергетичних ресурсів;
- необхідність зниження екологічного навантаження;
- підвищення ефективності вітроенергетичних установок;
- удосконалення систем керування та електроприводу генераторів.

За даними міжнародних енергетичних організацій, у 2025 році світова встановлена потужність вітроелектростанцій перевищила 1,2 ТВт, а річний приріст нових потужностей склав понад 150 ГВт. Частка електроенергії, виробленої вітровими електростанціями, становить близько 12 % світового споживання електроенергії. Основними країнами-лідерами у сфері вітроенергетики є Китай, США, Німеччина, Індія та Бразилія.

Одним із головних напрямів розвитку сучасної вітроенергетики є будівництво офшорних (морських) вітроелектростанцій.



Рис. 1.2 Hornsea 2 (Великобританія, Офшорна, 1386 МВт)

Їх перевагами є вищі швидкості вітру, стабільність енергогенерації та можливість встановлення турбін великої потужності. Сучасні офшорні турбіни мають одиничну потужність понад 10–15 МВт, а діаметр ротора може перевищувати 200 м.

На сучасному етапі розвитку вітроенергетики значна увага приділяється підвищенню коефіцієнта корисної дії вітрогенераторних установок, зменшенню механічних втрат та покращенню характеристик електричних машин. Для цього використовуються:

- синхронні генератори з постійними магнітами;
- асинхронні генератори подвійного живлення;

- системи частотного регулювання;
- цифрові системи автоматичного керування;
- перетворювачі частоти та інтелектуальні системи моніторингу.



Рис. 1.3 Fantanele-Cogealac (Румунія, Наземна, 600 МВт)

Особливо актуальним є використання синхронних машин у складі вітроенергетичних установок. Такі генератори забезпечують високу ефективність, стабільність параметрів електроенергії та можливість роботи при змінній швидкості обертання ротора. Використання сучасних перетворювачів частоти дозволяє оптимізувати режими роботи установки та підвищити ефективність використання енергії вітру.

Однією з важливих проблем сучасної вітроенергетики є вплив нестабільності швидкості вітру на режими роботи енергосистеми. Значне проникнення відновлюваних джерел енергії в електричні мережі потребує вдосконалення систем регулювання частоти та стабілізації енергосистем. Для вирішення цієї проблеми використовуються системи накопичення

енергії, цифрові системи прогнозування та алгоритми адаптивного керування.

1.2. Конструкція вітрогенераторних установок

Вітрогенераторна установка (ВГУ) являє собою складний електромеханічний комплекс, призначений для перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в електричну енергію. Сучасні вітроенергетичні установки широко застосовуються як у централізованих енергосистемах, так і в автономних системах електропостачання, особливо для електрифікації віддалених об'єктів, фермерських господарств та малих населених пунктів. Особливу актуальність мають вітрогенератори малої потужності, що забезпечують локальне виробництво електроенергії при невеликих капітальних витратах та високому рівні енергетичної незалежності.

Основним джерелом енергії у вітроустановках є повітряний потік, що має певний запас кінетичної енергії. Робота вітрогенератора ґрунтується на перетворенні механічної енергії обертання ротора в електричну енергію генератором. Конструкція установки визначається типом ротора, способом орієнтації відносно напрямку вітру, типом електричної машини та системою регулювання потужності.

Типова вітроенергетична установка складається з таких основних елементів:

- вітроколесо (ротор з лопатями);
- механічна передача або мультиплікатор;
- електричний генератор;
- система орієнтації на вітер;
- система регулювання швидкості;
- щогла або башта;
- силовий перетворювач;
- акумуляторна батарея або інвертор;

- система автоматичного керування та захисту.

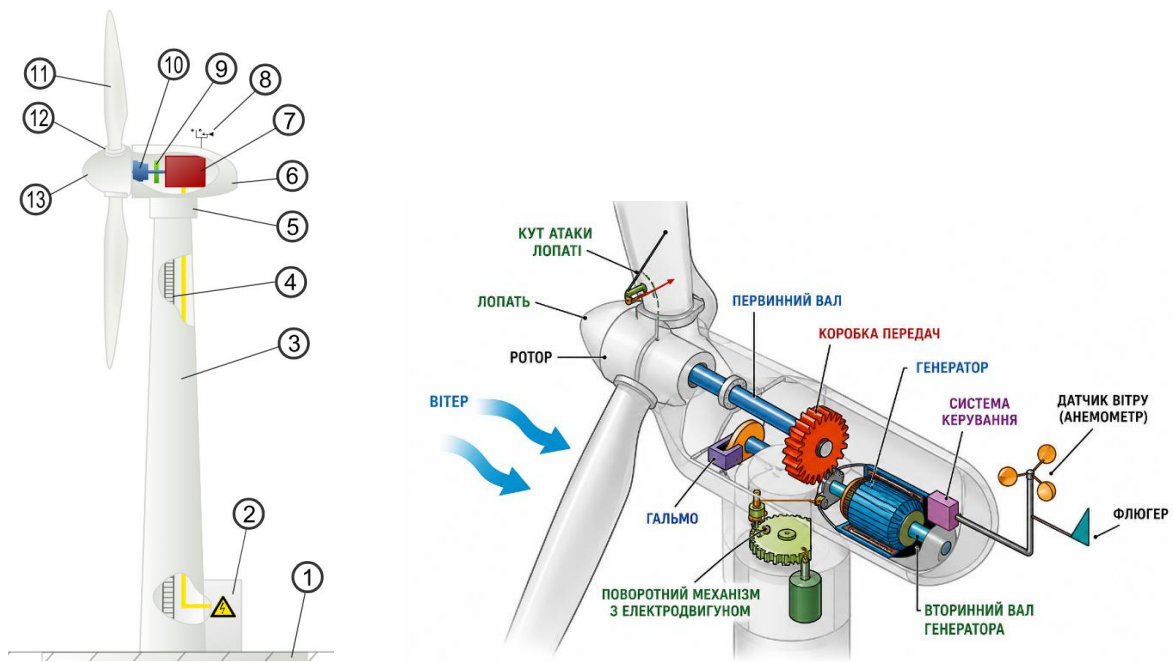


Рис. 1.4 Конструкція промислової вітрової установки

1- фундамент; 2 - силова шафа, що включає силові контактори й ланцюги керування; 3 - вежа; 4 - сходи; 5- поворотний механізм; 6 -гондола; 7 - електричний генератор; 8 - система спостереження за напрямком і швидкістю вітру (анемометр); 9 - гальмівна система; 10 - трансмісія; 11 - лопаті; 12 - система зміни кута атаки; 13- ковпак ротора;

Найважливішим елементом є вітроколесо, яке безпосередньо сприймає енергію вітру. Лопаті мають аеродинамічний профіль, подібний до профілю крила літака, що дозволяє створювати підйомну силу та обертальний момент.

Вітрогенератори класифікуються за напрямком осі обертання, кількістю лопатей, номінальною потужністю, призначенням та типом підключення до мережі. Розподіл на категорії дозволяє обрати оптимальне рішення як для приватного будинку, так і для промислових електростанцій.

За розташуванням осі обертання вітрогенератори поділяються на:

- горизонтально-осьові (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine);
- вертикально-осьові (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine).

Найбільш поширеними є горизонтально-осьові вітроустановки. Їх ротор розташований паралельно напрямку вітру. Зазвичай такі установки мають дві або три лопаті. Переваги:

- високий коефіцієнт використання енергії вітру;
- стабільна робота;
- високий ККД;
- можливість роботи при великих потужностях.

Недоліки:

- необхідність системи орієнтації на вітер;
- складність конструкції;
- підвищені вимоги до балансування ротора.

У вертикально-осьових установках вісь обертання розташована перпендикулярно напрямку повітряного потоку. Лопаті таких установок мають вертикальне розташування. Вони характеризуються низькою чутливістю до зміни напрямку вітру, оскільки здатні ефективно сприймати повітряні потоки з різних сторін. Крім того, вертикально-осьові конструкції працюють на невеликих швидкостях обертання, відзначаються зниженим рівнем шуму та забезпечують стабільну роботу навіть за умов поривчастого вітру. Основні типи: ротор Дар'є; ротор Савоніуса; гібридні конструкції.

Переваги:

- простота конструкції;
- відсутність системи орієнтації;
- можливість роботи при турбулентних потоках.

Недоліки:

- менший ККД;
- значні механічні навантаження;
- складність самозапуску деяких конструкцій.

Багатолопатекий ротор - це вертикально - осьова конструкція з великою кількістю лопатей яка робить її чутливою навіть до дуже слабкого

вітру. Ефективність таких вітрогенераторів дуже висока. Це потужний перетворювач. Енергія вітру використовується максимально.

Недоліки:

- велика вартість;
- високий звуковий фон;
- може давати великий обсяг електроструму.



а)



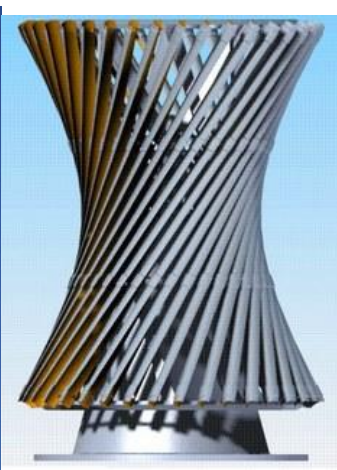
б)



в)



г)



д)

Рис. 1.5 Види вертикальних вітрогенераторів

а) ротор Савоніуса; б) ротор Дар'є; в) ротор Масгрува; г) багатолопатевий ротор; д) турбіна гіперболоїдного типу

Вітрова турбіна гіперболоїдального (або гіперболічного) типу — це різновид вертикального вітрогенератора, чії лопаті або корпус утворюють звужену до центру геометричну фігуру (однопорожнинний гіперболоїд). Ця конструкція поєднує аеродинамічні властивості з надзвичайною міцністю, що часто використовується для інтегрованих міських рішень.

За кількістю лопатей існують однолопатеві, дволопатеві, трилопатеві та багатолопатеві ВГУ.

Однолопатеві та дволопатеві установки характеризуються високою швидкохідністю та спрощеною конструкцією. Для їх ефективного запуску необхідна достатньо велика швидкість вітру. Такі вітрогенератори мають меншу масу ротора, однак під час роботи можуть створювати підвищені вібрації та динамічні навантаження.

Трилопатеві вітроустановки є найбільш поширеним типом сучасних вітрогенераторів і вважаються оптимальним рішенням у вітроенергетиці. Вони забезпечують найкраще співвідношення між аеродинамічною ефективністю, рівномірністю обертання, механічною стійкістю та низьким рівнем шуму. Саме трилопатеві конструкції найчастіше застосовуються як у малих, так і у промислових вітроенергетичних установках.

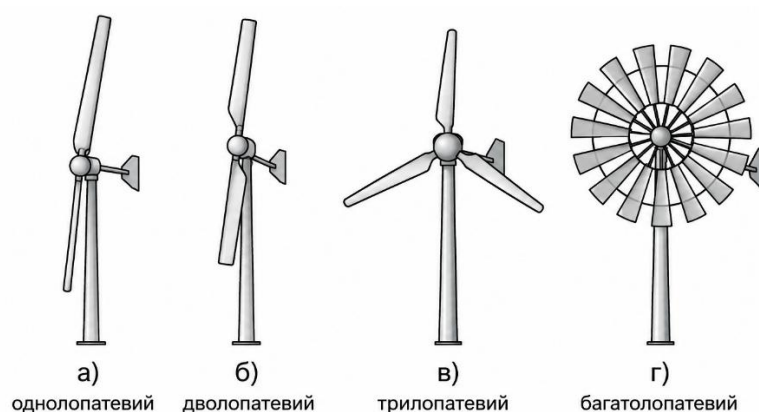


Рис. 1.6 Вітрогенератори за кількістю лопастей

Багатолопатеві (флюгерні) установки оснащуються значною кількістю лопатей, що дозволяє отримувати високий пусковий крутний

момент навіть при невеликих швидкостях вітру. Такі установки зазвичай використовуються для приводу механічних насосів, водопідіймальних систем або побутових потреб у районах із низьким вітровим потенціалом.

За потужністю розрізняють мали, середні, промислові вітрогенератори.

Малі вітрогенератори потужністю до 1–5 кВт застосовуються переважно для електропостачання приватних будинків, дачних споруд та невеликих господарств. Вони забезпечують живлення систем освітлення, побутових приладів та малопотужного електрообладнання.

Середні вітроустановки потужністю від 5 до 50 кВт використовуються для енергозабезпечення фермерських господарств, автономних об'єктів, телекомунікаційних станцій та невеликих комерційних споруд.

Промислові ВГУ потужністю від 100 кВт до 15 МВт і більше застосовуються у складі вітрових електростанцій. Такі установки мають значну висоту башти, великі діаметри ротора та складні системи автоматичного керування. Їх основним призначенням є генерація електроенергії для об'єднаних енергосистем.

За місцем розташування існують наземні, морські та дахові ВГУ.

Наземні вітроустановки (Onshore) розміщуються на суші у районах із високим середньорічним вітровим потенціалом. Вони є найбільш поширеним типом ВЕУ завдяки відносно нижчій вартості монтажу та обслуговування.

Морські вітроустановки (Offshore) встановлюються у прибережних морських акваторіях. Хоча їх будівництво потребує значних фінансових витрат, морські установки працюють в умовах стабільніших та інтенсивніших вітрових потоків, що дозволяє збільшити виробництво електроенергії приблизно на 30–40% порівняно з наземними аналогами.

Дахові та портативні вітрогенератори монтуються на дахах будівель або використовуються як мобільні джерела електроенергії. Вони

характеризуються компактністю та застосовуються для резервного або автономного живлення невеликих споживачів.

За принципом підключення та призначенням розрізняють автономні та мережеві системи.

Автономні вітроенергетичні системи (Off-grid) функціонують незалежно від централізованої електромережі. Вироблена електроенергія накопичується в акумуляторних батареях та через інвертор подається до споживача. Такі системи часто працюють у складі гібридних енергетичних комплексів разом із сонячними панелями.

Мережеві системи (On-grid) працюють паралельно із загальною електричною мережею. Вироблена електроенергія або безпосередньо споживається навантаженням, або передається до енергомережі за механізмом «зеленого тарифу». Перевагою таких систем є відсутність необхідності використання дорогих акумуляторних батарей.

1.3 Принцип роботи вітрогенераторної установки

Принцип роботи ВГУ базується на аеродинамічному перетворенні енергії повітряного потоку в механічну енергію обертання ротора. Потужність повітряного потоку визначається виразом:

$$P_{\text{в}} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.1)$$

де:

$P_{\text{в}}$ — потужність повітряного потоку, Вт;

ρ — густина повітря, кг/м³;

S — площа, що описується лопатями ротора, м²;

v — швидкість вітру, м/с.

Площа ротора визначається:

$$S = \pi R^2 \quad (1.2)$$

де:

R — радіус ротора.

Аналіз формули показує, що потужність вітрового потоку пропорційна кубу швидкості вітру. Тому навіть незначне збільшення швидкості вітру суттєво підвищує виробіток електроенергії.

Однак, використати всю енергію повітряного потоку неможливо.

Теоретична межа визначається законом Беца:

$$C_{p \max} = 0,593$$

де:

C_p — коефіцієнт використання енергії вітру.

На практиці сучасні вітроустановки мають:

C_p —0,48 для горизонтально-осьових машин;

C_p —0,35 для вертикально-осьових установок.

Реальна механічна потужність ротора визначається:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (1.3)$$

Механічний момент на валу ротора:

$$M = \frac{P_m}{\omega} \quad (1.4)$$

де:

M — крутний момент, Н·м;

ω — кутова швидкість обертання ротора, рад/с.

Однією з найважливіших характеристик вітроколеса є коефіцієнт швидкохідності:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (1.5)$$

де:

λ — коефіцієнт швидкохідності;

ω — кутова швидкість ротора;

R — радіус ротора;

v — швидкість вітру.

Для різних типів установок характерні такі значення:

- багатолопатеві установки: $\lambda = 3$;

- трилопатеві установки: $\lambda = 9$;
- ротор Дар'є: $\lambda = 6$.

Висока швидкохідність дозволяє зменшити масу генератора та підвищити ефективність системи.

У вітроенергетичних системах застосовуються:

- асинхронні генератори;
- синхронні генератори;
- генератори з постійними магнітами;
- безколекторні електричні машини.

Для вітрогенераторів малої потужності найбільш перспективними є синхронні генератори з постійними магнітами, оскільки вони мають:

- високий ККД;
- відсутність потреби у зовнішньому збудженні;
- компактність;
- можливість роботи при низьких обертах;
- високу надійність.

Частота генерованої напруги синхронного генератора визначається:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1.6)$$

де:

f — частота струму, Гц;

p — число пар полюсів;

n — швидкість обертання ротора, об/хв.

Напруга генератора залежить від швидкості обертання та магнітного потоку:

$$E = 4,44fw\Phi \quad (1.7)$$

де:

E — ЕРС генератора;

w — число витків;

Φ — магнітний потік.

Для забезпечення стабільної роботи ВГУ використовуються системи регулювання:

- регулювання кута атаки лопатей;
- електричне гальмування;
- механічне гальмування;
- регулювання навантаження;
- використання перетворювачів частоти.

При збільшенні швидкості вітру понад допустиме значення необхідно обмежувати механічну потужність, щоб уникнути перевантаження генератора та руйнування конструкції.

Сучасні системи керування реалізуються на базі мікроконтролерів та забезпечують:

- автоматичний запуск;
- контроль швидкості;
- стабілізацію напруги;
- захист від перевантажень;
- моніторинг параметрів.

Вітрогенератори малої потужності зазвичай мають потужність до 10–30 кВт і використовуються для автономного електропостачання.

Їх характерними особливостями є:

- невеликі габарити;
- спрощена конструкція;
- використання низькообертових генераторів;
- робота з акумуляторними системами;
- можливість автономної експлуатації.

Для підвищення ефективності сучасні установки оснащуються:

- МРРТ-контролерами;
- інверторами;
- системами накопичення енергії;
- цифровими системами керування.

1.4. Порівняння вітрогенераторів на базі асинхронної машини та синхронної машини з постійними магнітами

У сучасних системах малої вітроенергетики найбільшого поширення набули два типи електричних генераторів: асинхронні генератори та синхронні генератори з постійними магнітами. Вибір типу електричної машини суттєво впливає на ефективність роботи вітроенергетичної установки, стабільність генерації електроенергії, рівень втрат та складність системи керування.

Асинхронний генератор (індукційний генератор) працює за принципом електромагнітної індукції. Для створення магнітного поля йому необхідне зовнішнє джерело реактивної потужності — електрична мережа або батарея конденсаторів.

Основними перевагами асинхронних генераторів є:

- проста конструкція;
- невисока вартість;
- висока механічна міцність;
- простота технічного обслуговування.

До недоліків належать:

- необхідність споживання реактивної потужності;
- менший ККД;
- складність роботи при низьких швидкостях обертання;
- значні втрати у роторі;
- обмежена ефективність у системах зі змінною швидкістю вітру.

Принцип роботи асинхронного генератора базується на виникненні ковзання між швидкістю обертання ротора та синхронною швидкістю магнітного поля. Синхронна швидкість визначається виразом:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (1.8)$$

де:

n_s — синхронна швидкість, об/хв;

f — частота струму, Гц;

p — кількість пар полюсів.

Ковзання асинхронної машини:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.9)$$

де:

s — ковзання;

n — фактична швидкість ротора.

При генераторному режимі ротор обертається зі швидкістю, більшою за синхронну:

$n > n_s$ У цьому випадку енергія від вітроколеса передається до електричної мережі.

Синхронний генератор з постійними магнітами (PMSG — Permanent Magnet Synchronous Generator) не потребує зовнішнього джерела збудження, оскільки магнітне поле створюється постійними магнітами, розташованими на роторі.

Основними перевагами такого генератора є:

- високий коефіцієнт корисної дії;
- відсутність втрат на збудження;
- можливість роботи при низьких обертах;
- висока енергоефективність;
- стабільна робота при змінній швидкості вітру;
- компактність конструкції.

Недоліками є:

- вища вартість;
- використання дорогих магнітних матеріалів;
- складніша система керування;
- ризик розмагнічування магнітів при перегріві.

Частота струму синхронного генератора визначається залежністю:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1.10)$$

де:

f — частота електричного струму;

p — кількість пар полюсів;

n — швидкість обертання ротора.

Електрорушійна сила генератора:

$$E = 4,44f \cdot W \cdot N \cdot \Phi \quad (1.11)$$

де:

E — ЕРС генератора;

W — кількість витків обмотки;

N — число провідників;

Φ — магнітний потік.

Оскільки магнітний потік у СГПМ створюється постійними магнітами, відсутні втрати енергії на живлення обмотки збудження, що забезпечує підвищення ККД системи.

Порівняння енергетичних характеристик. Потужність вітрового потоку визначається рівнянням:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1.12)$$

де:

ρ — густина повітря, кг/м³;

S — площа, яку описують лопаті ротора, м²;

V — швидкість вітру, м/с.

Корисна механічна потужність турбіни:

$$P_m = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1.13)$$

де C_p — коефіцієнт використання енергії вітру.

Електрична потужність генератора:

$$P_e = \eta P_m \quad (1.14)$$

де:

η — ККД генератора;

P_m — механічна потужність турбіни.

Для асинхронних генераторів ККД зазвичай становить:

$$\eta_{AG} = 0,75 \div 0,88$$

Для синхронних генераторів з постійними магнітами:

$\eta_{MSG} = 0,90 \div 0,96$ Таким чином, використання синхронного генератора з постійними магнітами дозволяє підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну енергію.

Порівняння пускових характеристик. Асинхронний генератор має значний пусковий момент та потребує більшої швидкості вітру для початку генерації електроенергії. Електромагнітний момент асинхронної машини визначається:

$$M = \frac{3U^2 R_2 / s}{\omega_s \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} \quad (1.15)$$

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця генераторів

Характеристика	Асинхронний генератор	Синхронний генератор з постійними магнітами
Необхідність збудження	Потрібне	Не потрібне
ККД	Нижчий	Вищий
Робота на малих обертах	Обмежена	Ефективна
Реактивна потужність	Споживається	Практично відсутня
Складність конструкції	Невисока	Вища
Вартість	Нижча	Вища
Надійність	Висока	Висока
Робота зі змінною швидкістю	Обмежена	Ефективна
Маса установки	Більша	Менша
Пуск при слабкому вітрі	Гірший	Кращий

У синхронних генераторах з постійними магнітами пусковий момент значно менший, що забезпечує запуск генерації вже при невеликих швидкостях вітру. Це особливо важливо для малопотужних вітроенергетичних установок, які працюють у районах із нестабільними вітровими потоками.

1.5 Варіанти конфігурації систем

Основні варіанти конфігурації вітроенергетичних систем:

1. Автономні вітроенергетичні установки працюють незалежно від централізованої електричної мережі. У такому режимі ВЕУ може функціонувати як самостійне джерело або як резервне живлення. Подібні системи широко застосовуються для енергозабезпечення приватних домогосподарств, фермерських господарств та малих підприємств.

2. Гібридні енергетичні системи передбачають спільне використання вітроенергетичних установок з іншими джерелами енергії, такими як дизель-генератори або сонячні фотоелектричні модулі. Таке поєднання дозволяє підвищити надійність енергопостачання та забезпечити безперервну подачу електроенергії навіть за відсутності вітру.

3. Вітро-дизельні системи. Даний тип систем включає вітроенергетичну установку та дизель-електричну станцію. Вони можуть працювати у трьох режимах: дизельному, спільному (вітро-дизельному) та вітровому. У дизельному режимі основне навантаження покривається дизель-генераторами, які забезпечують необхідну активну та реактивну потужність. Регулювання частоти здійснюється системами розподілу навантаження та швидкості двигунів, а стабілізація напруги — автоматичними регуляторами збудження. Оптимізація роботи спрямована на зниження витрат палива та підвищення економічної ефективності за рахунок раціонального планування режимів роботи генераторів.

4. Вітро-сонячні енергетичні комплекси поєднують вітроустановки та фотоелектричні модулі для перетворення енергії сонячного

випромінювання. Незважаючи на високу вартість фотоелектричних панелей, їх комбінація з ВЕУ є ефективною завдяки сезонній взаємодоповнюваності ресурсів: у зимовий період переважає вітрова генерація, тоді як у літній — сонячна.

5. Системи з використанням мікро ГЕС. Вітроустановки можуть працювати у складі комбінованих систем із мікрогідроелектростанціями, які мають накопичувальні резервуари. У періоди достатньої швидкості вітру навантаження покривається ВЕУ, а при його відсутності — мікроГЕС забезпечує електропостачання. Такі системи особливо ефективні в умовах обмежених гідроресурсів.

6. Мережеві вітроенергетичні установки інтегровані в централізовану електричну мережу, яка забезпечує їх необхідною потужністю для запуску, роботи та керування. Вироблена електроенергія передається безпосередньо в мережу. Такі системи зазвичай розміщуються у регіонах із високим вітроенергетичним потенціалом і об'єднуються у вітрові електростанції (вітроферми), які складаються з групи турбін, розташованих рядами, орієнтованими перпендикулярно до переважного напрямку вітру.



Рис. 1.7 Гібридна вітро-сонячна система с інтеграцією в централізовану мережу

РОЗДІЛ 2. ВІБІР ВІТРОГЕНЕРАТОРА

2.1 Визначення потужності вітрогенератора

Одним із найважливіших етапів проєктування вітроенергетичної установки є визначення необхідної потужності вітрогенератора.

Потужність вітрової установки залежить від швидкості вітру, площі, яку перекривають лопаті ротора, густини повітря та коефіцієнта використання енергії вітру.

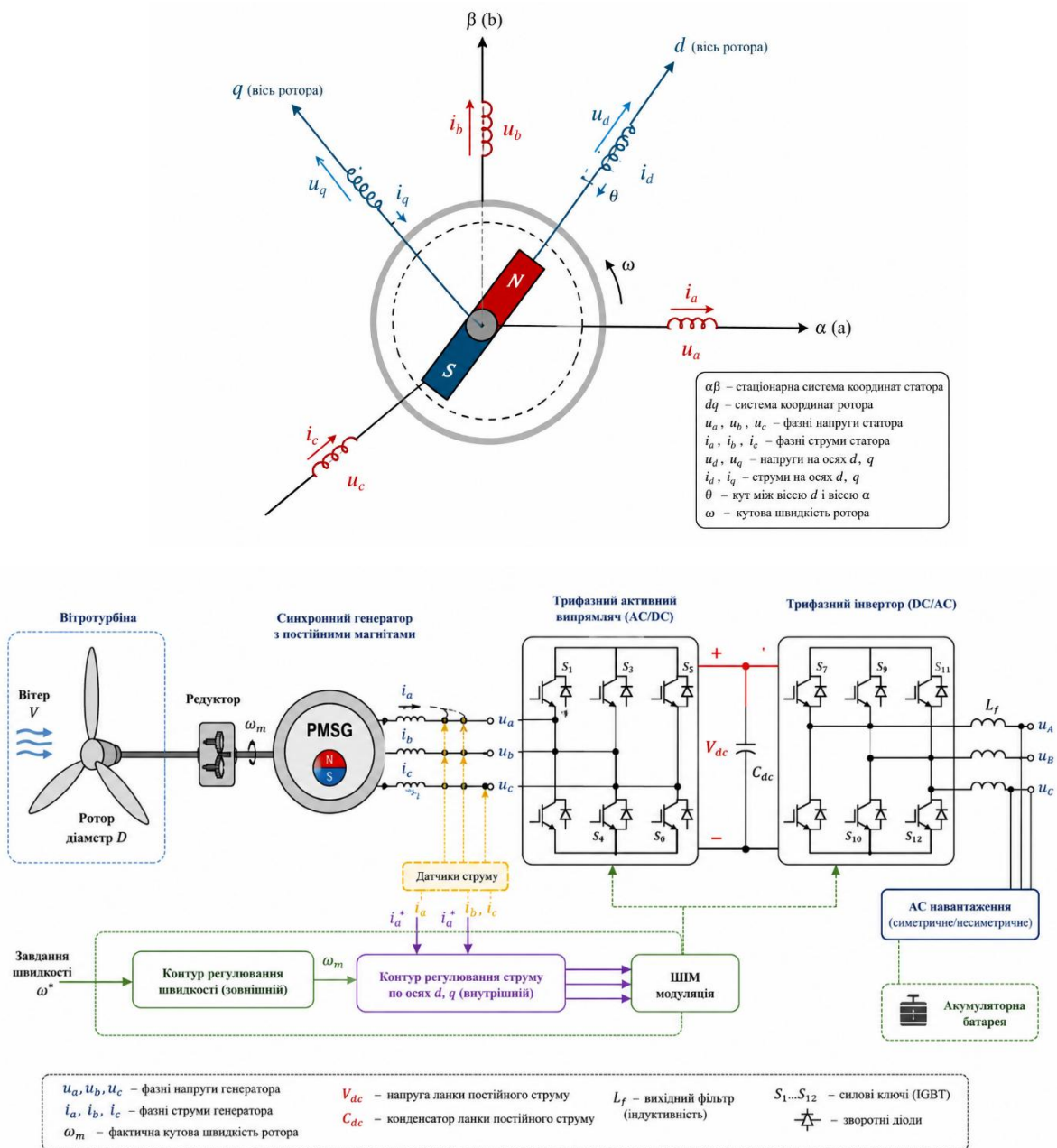


Рис. 2.1 Схема синхронного генератора з постійними магнітами

Вихідна потужність генератора вітроелектричної установки залежить від конструкції лопатей вітроколеса та кінетичної енергії повітряного потоку. Крім того, на потужність генератора суттєво впливають форма, аеродинамічний профіль та кількість лопатей вітроколеса.

Кінетична енергія повітряної маси, що рухається із середньою швидкістю V через поперечний переріз площею S , розташований перпендикулярно напрямку вітру, визначається за формулою [6]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{mV^2}{2} \quad (2.1)$$

де:

m – маса повітря, кг;

V – швидкість вітру, м/с.

Маса повітряного потоку визначається за виразом:

$$m = \rho \cdot V \cdot S \quad (2.2)$$

де:

$\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря за нормальних кліматичних умов

($t = 15^\circ\text{C}$, атмосферний тиск $101,3\text{кПа}$ або 760мм рт. ст.);

S – площа, яку описує вітроколесо, м^2 ;

V – швидкість вітру, м/с.

Для вітроелектричної установки з горизонтальною віссю обертання площа, що омивається лопатями вітроколеса, визначається за формулою:

$$S = \pi R^2 \quad (2.3)$$

де:

R – радіус вітроколеса, м.

Електрична потужність генератора вітроенергетичної установки в основному залежить від радіуса вітроколеса та швидкості вітру.

Кінетична потужність повітряного потоку:

$$P_{\text{кін}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3$$

З урахуванням коефіцієнта використання енергії вітру ξ :

$$P_{\text{кін}} = 0,5\pi\rho\xi R^2V^3 \quad (2.4)$$

де:

ρ – густина повітря, кг/м³;

$\xi = 0,4...0,45$ – коефіцієнт використання енергії вітру.

Після підстановки середніх значень коефіцієнтів у формули (2.3) та (2.4) отримуємо орієнтовний вираз для визначення електричної потужності генератора вітроенергетичної установки. Якщо прийняти середні значення, то отримуємо:

$$P_{\text{кін}} = 0,56 \cdot R^2 \cdot V^3$$

де:

$\rho = 1,226$ кг/м³;

$\xi = 0,425$;

V – швидкість вітру, м/с;

$\eta_{\text{мех}} = 0,85$;

$\eta_{\text{Г}} = 0,8$.

Енергосиловий розрахунок параметрів вітротурбіни полягає у визначенні крутного моменту, що розвивається на роторі, та оцінці потужності, яку турбіна відбирає з потоку вітру. Потужність вітротурбіни визначається за виразом:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (2.5)$$

де:

P — потужність вітротурбіни;

ρ — густина повітря;

$A = \pi R^2$ — площа, яку описують лопаті ротора;

$C_p(\lambda, \beta)$ — коефіцієнт потужності (залежить від швидкохідності λ та кута атаки β);

Площа ометання ротора:

$$A = \pi R^2 \quad (2.6)$$

Швидкохідність (коефіцієнт швидкохідності) визначається як:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.7)$$

де:

R — радіус лопатей ротора;

ω_p — кутова швидкість обертання ротора;

V — швидкість вітру.

Номінальна швидкохідність λ_n визначається конструктивними особливостями вітроустановки. Синхронна (гранична) швидкохідність λ_0 відповідає режиму, при якому коефіцієнт використання енергії вітру $C_p \lambda_0 = 0$. Ця залежність описує, що C_p досягає максимуму при номінальній швидкохідності λ_n і зменшується до нуля при наближенні до граничної швидкохідності λ_0 .

Для діапазону швидкохідності $\lambda_n < \lambda < \lambda_0$ для моделювання аеродинамічної характеристики вітротурбіни використовується наближене аналітичне рівняння:

$$C_p(\lambda) = C_{p,max} \left(1 - \frac{(\lambda - \lambda_n)^2}{(\lambda_0 - \lambda_n)^2} \right) \quad (2.8)$$

де:

$C_{p,max}$ — максимальний коефіцієнт використання енергії вітрового потоку.

У діапазоні швидкохідності від 0 до λ_n ($\lambda < \lambda_n$) коефіцієнт використання енергії вітру C_p можна апроксимувати виразом:

$$C_p = C_{p,max} \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^2 \left[-2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right) + 3 \right] \quad (2.9)$$

Числове значення λ_0 визначається залежно від параметра σ_{per} , який характеризує сумарну відносну ширину хорд профілів на периферії вітроколеса відносно радіуса R пов'язаний із шириною кінчика лопаті b_{per} та кількістю лопатей i :

$$\sigma_{per} = \frac{i b_{per}}{R} \quad (2.10)$$

Після визначення σ_{per} значення λ_0 апроксимується виразом:

$$\lambda_0 = \frac{188,93 \sigma_{\text{per}} + 20,62}{28,22 \sigma_{\text{per}} - 1}$$

Далі обертальний момент, що діє на вал, визначається як:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (2.11)$$

Отже, з наведених залежностей випливає, що обертальний момент, який розвивається на валу вітротурбіни, безпосередньо залежить від потужності вітрового потоку, а отже — від швидкості вітру v_w , оскільки саме вона визначає величину доступної аеродинамічної потужності.

2.2 Вибір об'єкта модернізації

Найбільшого поширення набули вітроенергетичні установки з крильчастими вітроколесами та горизонтальною віссю обертання, які характеризуються високою ефективністю перетворення енергії вітру в електричну енергію.

Для малої вітроенергетики зі середньої швидкістю вітра 3–8 м/с зазвичай беруть вітрогенератор з параметрами:

- потужність: 0,5 – 3 кВт
- напруга: 24 / 48 В або 220 В (через інвертор)
- тип генератора: синхронний (PMSG – permanent magnet synchronous generator).

Переваги синхронного генератора (PMSG)

- високий ККД (до 85–95%);
- не потребує збудження (немає втрат на обмотку ротора);
- добре працює при змінній швидкості вітру;
- проста інтеграція з контролером/інвертором;
- низьке обслуговування;

Недоліки:

- дорожчий за асинхронний;
- потребує випрямляча + контролера;

Таблиця 2.1 - Порівняння малих ВГ на базі синхронної машини

Модель	Номінальна потужність, кВт	Стартовий вітер м/с	Річна генерація кВт/рік	Діаметр ротора, м	Вартість, грн
Bergey Excel 1	1	3,5	2000–3500	2,5	180 000
Aeolos-H 1kW	1	3	1800–3200	3,1	60 000
Generic 1 kW	0,8	3,5	1200–2500	2,0	20 000
Windmax HY1000	1	4	1000–2200	2,1	25 000
Rutland 1200	0,6	3	600–1200	1,2	30 000

Найбільш раціональним варіантом для проєкту є вітрогенератор Aeolos-H 1KW.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики вітрогенератор Aeolos-H 1KW

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	1
Максимальна потужність, кВт	до 1,5
Напруга виходу, В	48(DC, для зарядки акумуляторів)
Тип генератора	Трифазний, PMSG
Кількість лопатей	3 лопаті зі склопластику
Швидкість ротора, об/хв	350
Діаметр ротора, м	3,1
Початкова швидкість вітру, м/с	2,5
Номінальна швидкість вітру, м/с	10
Гранична швидкість вітру, м/с	45
Річна генерація електроенергії, кВт·год/рік (при середньому вітрі ~6 м/с)	2120
Рівень шуму, дБ	30
Маса установки, кг	~60–63
Діапазон робочих температур	від –20°C до +50°C
Термін служби, років	до 20

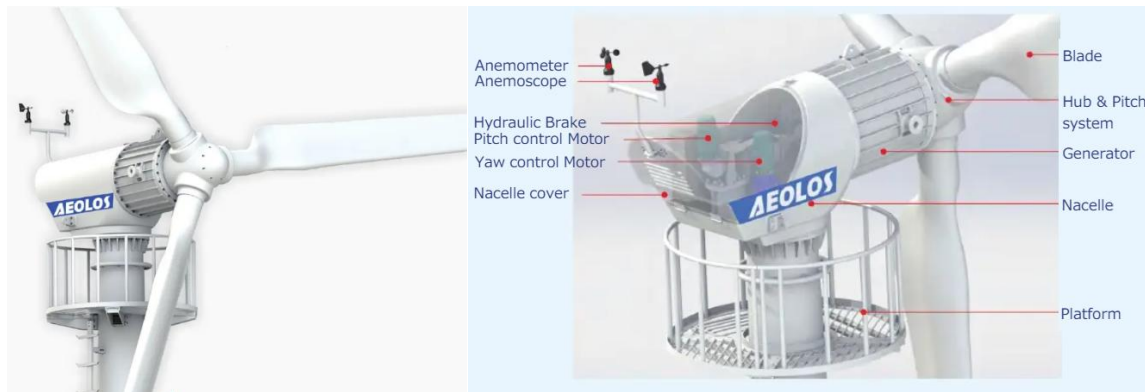


Рис. 2.2 Зовняшній вигляд та основні конструктивні вузли Aeolos-H 1KW

2.3 Аналіз недоліків базової конструкції вітрогенератора

Вітроенергетична установка Aeolos 1kW належить до установок малої потужності та оснащена синхронним генератором на постійних магнітах. Такі установки характеризуються простотою конструкції, високою надійністю та можливістю автономного електропостачання споживачів. Проте традиційна схема підключення генератора через випрямляч без застосування перетворювача частоти має низку суттєвих недоліків. Номінальна потужність генератора та номінальна частота обертання визначаються на основі розрахунку параметрів ротора вітроустановки.

Потужність, яку може отримати вітротурбіна від повітряного потоку, визначається виразом:

$$P_{\text{ном}} = 0,5C_p \rho S V^3$$

де:

C_p — коефіцієнт використання енергії вітру;

ρ — густина повітря;

S — площа, яку описує ротор;

V — швидкість вітрового потоку.

З формули видно, що потужність залежить від куба швидкості вітру. Навіть незначна зміна швидкості повітряного потоку призводить до суттєвої зміни доступної механічної потужності.

Одним із головних недоліків існуючої системи електропостачання вітрогенератора є нестабільність вихідних електричних параметрів при зміні швидкості вітру. Синхронний генератор безпосередньо з'єднаний з вітроколесом, частота та напруга генерованої електроенергії залежать від частоти обертання ротора. Оскільки швидкість вітру постійно змінюється, частота обертання ротора генератора також змінюється. Частота генерованої напруги визначається залежністю:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (2.12)$$

де:

n — швидкість обертання, об/хв

f — частота живлення, Гц

p — кількість пар полюсів

З наведеного виразу видно, що при збільшенні швидкості обертання ротора частота електричної енергії зростає, а при її зменшенні – знижується. Крім частоти змінюється і величина вихідної напруги генератора. ЕРС (електрорушійна сила) напруга, яку генерує генератор безпосередньо в його обмотках під дією магнітного поля синхронної машини визначається виразом

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \quad (2.13)$$

де:

E — ЕРС генератора, В;

f — частота струму, Гц;

N — кількість витків обмотки;

Φ — магнітний потік постійних магнітів, Вб.

Таким чином, напруга генератора прямо залежить від частоти обертання ротора та швидкості вітру.

У традиційній системі без перетворювача частоти швидкість обертання ротора практично не узгоджується з поточними вітровими

умовами. Внаслідок цього турбіна значну частину часу працює поза оптимальним режимом.

Основним параметром, що визначає ефективність роботи вітротурбіни, є коефіцієнт швидкохідності:

$$\lambda = \omega R/V \quad (2.14)$$

Для кожної турбіни існує оптимальне значення λ_{opt} , при якому коефіцієнт використання енергії вітру C_p досягає максимального значення.

Частота обертання ротора визначається через коефіцієнт швидкохідності:

$$\omega_r = \frac{\lambda V}{R} \quad (2.15)$$

У разі зміни швидкості вітру без регулювання частоти обертання відбувається відхилення коефіцієнта швидкохідності від оптимального значення, що призводить до зниження коефіцієнта C_p та втрати частини доступної енергії.

Крім втрати енергії, відсутність регулювання швидкості призводить до виникнення додаткових механічних навантажень на вал, підшипники та лопаті ротора. Під час різких поривів вітру виникають ударні навантаження, які скорочують ресурс механічних вузлів установки.

Площа захопленої поверхні ротора:

$$S = \frac{2P_{ном}}{C_p \rho V^3} \quad (2.16)$$

Радіус ротора обчислюється за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (2.17)$$

Номінальна потужність генератора визначається з урахуванням втрат у трансмісії:

$$P_r = \eta P_{ном} \quad (2.18)$$

де:

η — ККД передачі від ротора до генератора.

Номинальна частота обертання генератора визначається з урахуванням передавального відношення трансмісії:

$$\omega_{\text{ном}} = i_T \omega_{\Gamma} \quad (2.19)$$

де:

ω_{Γ} — кутова швидкість генератора;

ω_p — кутова швидкість ротора вітроустановки;

i_T — передавальне відношення трансмісії від ротора до генератора.

Фазна напруга та частота вихідної напруги визначаються відповідно до вимог системи генерування електричної енергії. Потужність трифазного генератора визначається за формулою:

$$P = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi \quad (2.20)$$

де:

U_{ϕ} — фазна напруга;

I_{ϕ} — фазний струм;

$\cos \varphi \approx 0,8 \div 0,85$ — коефіцієнт потужності.

Для генератора потужністю 1 кВт при напрузі 230 В і коефіцієнті потужності 0,85 струм становитиме

$$I_{\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\phi} \cos \varphi} = \frac{1000}{1,732 \cdot 230 \cdot 0,85} = 2,95 \text{ А} \quad (2.21)$$

Електромагнітний момент генератора визначається за формулою:

$$M_{\Gamma} = \frac{P}{\omega} = \frac{9550 \cdot P}{n} \quad (2.22)$$

де:

M_{Γ} — електромагнітний момент генератора;

ω — кутова швидкість обертання.

Також електромагнітний момент визначається за формулою:

$$M_e = \frac{\pi}{3} A_c B_{\delta} D^2 l \alpha \quad (2.23)$$

де:

$\alpha \approx 0,72 \div 0,8$ — коефіцієнт полюсного перекриття;

$A_c \approx (10 \div 12) \cdot 10$ — лінійне навантаження;

B_δ — індукція в повітряному зазорі;

D — діаметр статора;

l — активна довжина тороїдального осердя статора;

$\lambda = \frac{l}{D}$ — відношення активної довжини до діаметра статора.

У базовій схемі використовується трифазний діодний випрямляч.

Напруга на його виході визначається залежністю:

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_\phi = 1,732 \cdot U_\phi \quad (2.24)$$

$$U_{dc} = \left(3 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \right) \cdot U_\phi = 1,35 \cdot U_l$$

де:

U_l — лінійна напруга;

U_{dc} - напруга в ланці постійного струму (DC-шині) після випрямляча;

U_ϕ — фазна напруга.

Отже, будь-які коливання напруги генератора безпосередньо передаються до ланки постійного струму та навантаження.

Внаслідок цього електрична енергія має нестабільні параметри, що знижує якість електропостачання та ефективність роботи вітроенергетичної установки.

2.4 Розрахунок силового перетворювача

На підставі проведеного аналізу для підвищення ефективності роботи вітроенергетичної установки пропонується застосування перетворювача потужності, який складається з активного випрямляча, ланки постійного струму та PWM-інвертора. Така структура дозволяє відокремити режими роботи синхронного генератора від параметрів навантаження та забезпечити формування стабільної напруги частотою 50 Гц незалежно від швидкості вітру.

Для реалізації активного випрямляча обрано силовий IGBT-модуль SKM25GD125D виробництва SEMIKRON.

Таблиця 2.3 - Основні технічні характеристики IGBT модуля SKM25GD125D

Параметр	Значення
Тип модуля	IGBT Six-Pack
Максимальна напруга колектор-емітер V_{CES}	1200 В
Напруга керування затвором V_{GE}	± 20 В
Напруга насичення $V_{CE(sat)}$	$\approx 3,2$ В
Номінальний струм колектора I_{Cnom}	25 А
Максимальний струм колектора I_C	39 А
Постійний прямий струм	47 А
Тип топології	Трифазний міст (Six-Pack)
Робоча частота комутації	понад 15 кГц
Наявність вбудованих швидкодіючих зворотних діодів	так
Можливість роботи у складі PWM-перетворювачів.	так
Тип діодів	Швидкодіючі CAL-діоди
Габаритні розміри	$105 \times 45 \times 18$ мм
Вага	0,175 кг

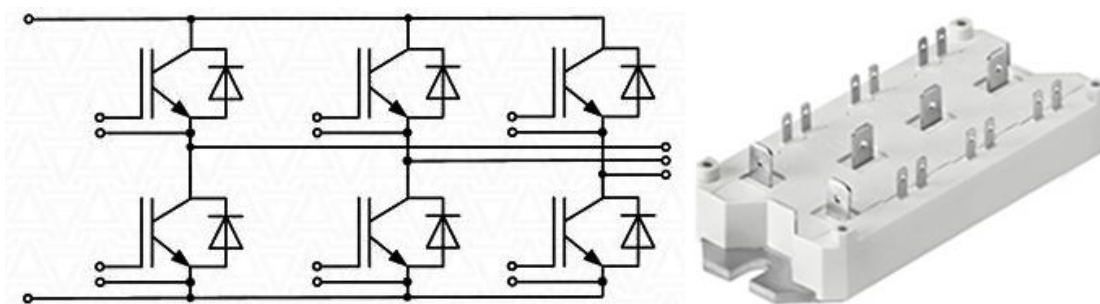


Рис. 2.5 Топологія внутрішнього з'єднання SKM25GD125D

Активний випрямляч реалізовано на базі трьох IGBT-модулів SKM25GD125D, що утворюють трифазний мостовий перетворювач.

Вибір даного модуля обумовлений тим, що його технічні характеристики значно перевищують розрахункові параметри вітроенергетичної установки потужністю 1 кВт, що забезпечує необхідний запас надійності та довговічності роботи силового перетворювача.

Для забезпечення роботи однофазного PWM-інвертора з вихідною напругою 230 В необхідно сформувавши достатній запас напруги у ланці постійного струму. Амплітудне значення вихідної напруги становить:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U = 325 \text{ В}$$

Для надійної роботи інвертора напруга DC-шини повинна перевищувати амплітудне значення вихідної напруги на 10–15 %. Тому приймаємо:

$$U_{dc} = 350 \text{ В}$$

Отримане значення забезпечує стійку роботу PWM-інвертора та необхідний запас для регулювання.

Струм у ланці постійного струму визначається за формулою:

$$I_{dc} = \frac{P}{U_{dc} \cdot \eta} = \frac{1000}{350 \cdot 0,95} = 3,01 \quad (2.25)$$

З урахуванням можливих перевантажень:

$$I_{dc} = 5 \text{ А}$$

Обраний модуль SKM25GD125D має:

- номінальний струм 25 А;
- максимальну напругу 1200 В.

Коефіцієнт запасу за струмом:

$$K_i = \frac{25}{5} = 5$$

Коефіцієнт запасу за напругою:

$$K_U = \frac{1200}{350} = 3,43$$

Отримані значення підтверджують достатній запас надійності силового перетворювача.

2.5 Розрахунок акумуляторної батареї

Номінальна потужність вітрогенератора Aeolos становить 1 кВт. Однак зазначена потужність досягається лише при номінальній швидкості вітру, яка спостерігається протягом обмеженого часу. У реальних умовах експлуатації швидкість вітру є змінною величиною, тому середня потужність вітроенергетичної установки є меншою за номінальну. Для вітрогенераторів малої потужності середня експлуатаційна потужність зазвичай становить 30–50% від номінальної. Розрахункова потужність визначається:

$$P_{\text{срп}} = k_{\text{вик}} \cdot P_{\text{ном}} = 0,4 \cdot 1000 = 400 \text{ Вт}$$

де:

$P_{\text{срп}}$ – середня розрахункова потужність

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність вітрогенератора;

$k_{\text{вик}}$ – коефіцієнт використання встановленої потужності, 0,4.

Для вітроенергетичної установки потужністю 1 кВт приймається акумуляторна батарея напругою 48 В, що дозволяє зменшити робочі струми та втрати електроенергії в колах постійного струму. Максимальний струм заряду визначається:

$$I_{\text{зар}} = \frac{P_{\text{срп}}}{U_{\text{АКБ}}} = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ А}$$

Приймаємо струм заряду 8,5 А

Для забезпечення резервного живлення приймаємо час автономної роботи $t = 4$ год.

Необхідний запас енергії:

$$W = P_{\text{срп}} \cdot t = 400 \cdot 4 = 1600 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Необхідна ємність акумуляторної батареї:

$$C = \frac{W}{U_{\text{АКБ}}} = \frac{1600}{48} = 33,3 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Для забезпечення резерву по ємності приймається коефіцієнт запасу $k_3 = 1,3$. Тоді:

$$C_{\text{розр}} = 33,3 \cdot 1,3 = 43,3 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Приймаємо стандартне значення $C_{\text{АКБ}} = 50 \text{ А} \cdot \text{год}$

На підставі виконаних розрахунків для модернізованої вітроенергетичної установки обрано акумуляторну батарею типу DYNESS B4850 LiFePO4 48V/50AH (2400W·h).

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики АКБ DYNESS B4850

Параметр	Значення
Ємність батареї	50 Ah
Енергія батареї	2,4 kW·h
Цикл життя	6000 циклів
Діапазон робочої напруги	42 V - 54 V
Зарядний струм (макс.)	50 A
Рекомендований струм розряду	25 A
Максимальна потужність	2,64 kW
Номінальна довготривала потужність батареї	1,2 kW
Струм відключення (макс.)	55 A
Рекомендована робоча температура заряду	-20°C +45°C
Вихід	COM/RS485 BMS на інвертор
Вага	22 кг



Рис. 2.3 АКБ DYNESS B4850 LiFePO4 48V/50AH (2400W·h).

2.6 Контролер заряду акумуляторної батареї

Для узгодження роботи вітрогенератора та акумуляторної батареї у модернізованій системі передбачено встановлення контролера заряду. Контролер забезпечує підтримання оптимального режиму заряджання акумуляторної батареї, захист від перезаряду та глибокого розряду, а також стабільну роботу системи при зміні швидкості вітру. Потужність заряду акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$P_{\text{зар}} = U_{\text{АКБ}} \cdot I_{\text{зар}} = 48 \cdot 8,5 = 408 \text{ Вт}$$

Струм контролера повинен бути не меншим за максимальний струм заряду акумуляторної батареї:

$$I_{\text{контр}} \geq I_{\text{зар}}$$

З урахуванням запасу за струмом приймається контролер заряду GreenChip W1500.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики КЗ GreenChip W1500

Параметр	Значення
Робоча напруга	12/24/36/48 В
Максимальний струм баласту	50 А
Робоча потужність	1500 Вт
Максимальна потужність	3000 ват
Номінальний струм заряджання АКБ	0-30 А (регулюється в меню)
Напруги заряджання АКБ	0-65 В (регулюється в меню)
Технологія	PWM (ШИМ)
Споживання струму контролером	10 мА
Температурний діапазон	-30°C +60 °C
Розмір	230x120x70 мм



Рис. 2.4 Контролер заряду GreenChip W1500

2.7 Вибір інвертора

Енергія від вітрогенератора не може безпосередньо використовуватися, оскільки:

- напруга та частота змінюються залежно від вітру;
- після випрямлення отримуємо нестабільну постійну напругу;
- побутові прилади вимагають стабільні 220 В АС.

Інвертор виконує функцію:

- перетворення енергії з акумулятора 48 В у стабільні 220 В;
- формування синусоїдальної напруги, придатної для навантаження;
- узгодження роботи системи «вітрогенератор – накопичувач – споживач».

Інвертор IPOWER 48–220 В 1500 Вт від відомого виробника АВВ — це перетворювач електричної енергії, який перетворює постійну напругу 48В у змінну напругу 220В 50Гц з чистою синусоїдальною формою.



Рис. 2.7 Інвертор IPOWER 48–220 В 1500 Вт

Технічні характеристики інвертора IPOWER 48–220 В 1500 Вт

Параметр	Значення
Вхідна напруга	40-55 В DC
Вихідна напруга	210 В - 240 В змінного струму
Частота	50 Гц
Безперервна вихідна потужність	1500 Вт
Максимальна вихідна потужність (пікова)	3000 Вт
Вихідна форма хвилі	Чиста синусоїда
Ефективність перетворення	Не менше 90%
Діапазон робочих температур	-40...+40°C
Захист від зворотної полярності	Так
Захист від перегріву	Так
Захист від переполюсовки	Так
Ступінь захисту IP	65
Габаритні розміри ДхШхВ	320x150x70 мм
Вага	17,5 кг

Вихідна потужність:

$$P_{\text{вих}} = 1500 \text{ Вт}$$

Струм навантаження:

$$I_{220} = \frac{P_{\text{вих}}}{U} = \frac{1500}{220} = 6,8 \text{ А}$$

Вхідна потужність (ККД $\approx 0,9$):

$$P_{\text{вх}} = 0,9 \cdot 1500 \text{ Вт} \approx 1350 \text{ Вт}$$

Струм від акумулятора (48 В):

$$I_{48} = \frac{P_{\text{вх}}}{U} = \frac{1350}{48} = 28,1 \text{ А}$$

Проведені розрахунки дозволяють обґрунтувати вибір інвертора, перевірити узгодження елементів системи та забезпечити її безпечну

роботу. Вони показують реальні струми та потужності в системі, що необхідно для правильного підбору акумуляторної батареї, провідників та оцінки навантаження на вітрогенератор.

2.8 Розрахунок параметрів регулятора напруги DC-шини та ємності конденсатора DC-шини

Для стабілізації напруги U_{dc} застосовується ПІ-регулятор, передавальна функція якого має вигляд:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.26)$$

де:

K_p — пропорційний коефіцієнт, що визначає швидкість реакції системи;

K_i — інтегральний коефіцієнт, що забезпечує усунення статичної похибки;

s — це комплексна змінна Лапласа.

$$s = \sigma + j\omega$$

Змінна s у передавальній функції ПІ-регулятора є комплексною змінною Лапласа, що використовується для аналізу динамічних режимів системи керування. Використання зображення $1/s$ відповідає інтегруванню сигналу помилки, що забезпечує усунення статичної похибки регулювання напруги DC-шини. Параметри регулятора підбираються з умови забезпечення заданої швидкодії та запасу стійкості системи керування.

Конденсатор у ланці постійного струму (DC-шині) – це елемент, який накопичує та віддає електричну енергію, згладжуючи пульсацію напруги після випрямляча. В системі вітрогенератор → випрямляч → DC-шина (конденсатор) → інвертор → навантаження він виконує ключові функції:

- згладжування пульсацій після випрямлення;
- накопичення енергії при короткочасних коливаннях вітру;
- стабілізація напруги DC-шини;
- захист інвертора від стрибків напруги;
- зменшення гармонік та перешкод.

Після випрямляча напруга не ідеально постійна, вона має пульсації:

$$U_{DC}(t) = U_{avg} + \Delta U \quad (2.27)$$

Якщо конденсатора немає або він малий:

- зростає пульсація напруги;
- інвертор працює нестабільно;
- збільшуються втрати;
- можливий пробою силових ключів (IGBT).

Потужність вітрогенератора:

$$P = 1000 \text{ Вт}$$

Напруга DC-шини:

$$U_{DC} = 48 \text{ В}$$

Допустима пульсація напруги:

$$\Delta U = 2 \text{ В}$$

Частота пульсацій після випрямляча:

$$f = 100 \text{ Гц}$$

Струм визначається за формулою:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{48} = 20,83 \text{ А}$$

де:

P — потужність, Вт;

U — напруга DC-шини, В.

Отже, номінальний струм у DC-шині становить $\approx 21 \text{ А}$

Ємність конденсатора визначається за формулою:

$$C = \frac{I}{f \cdot \Delta U} = \frac{20,83}{100 \cdot 2} = 0,104 \text{ Ф} \quad (2.28)$$

або

$$C = 104000 \text{ мкФ}$$

Перевірка запасу енергії в конденсаторі. Енергія, накопичена в конденсаторі:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{0,104 \cdot 48^2}{2} = 119,81 \text{ Дж}$$

Отже,

$$E \approx 120 \text{ Дж}$$

Для забезпечення стабільної роботи інвертора та зменшення пульсацій напруги в DC-шині вітроенергетичної установки потужністю обираємо батарею конденсаторів загальною ємністю не менше 100000 мкФ.

Відповідно до виконаного розрахунку необхідна ємність становить:

$$C = 104000 \text{ мкФ}$$

Для реалізації даного рішення обираємо електролітичні конденсатори JML-22000/63V ємністю 22000 мкФ та номінальною напругою 63 В.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики конденсатора JML-22000/63V

Параметр	Значення
Тип конденсатора	Електролітичний
Ємність конденсатора	22000 мкФ
Номінальна напруга	63 В
Робоча напруга системи	48 В
Температурний діапазон	-40...+105 °C
Схема з'єднання	Паралельна
Тип конденсатора	Електролітичний

Кількість конденсаторів визначається за формулою:

$$n = \frac{C}{C_1} = \frac{104000}{22000} = 4,73$$

де:

C — необхідна сумарна ємність;

C_1 — ємність одного конденсатора.

Приймаємо $n = 5$ шт.

Сумарна ємність батареї становитиме:

$$C_{\Sigma} = 5 \cdot 22000 = 110000 \text{ мкФ}$$

Отримана ємність перевищує розрахункову, що забезпечує необхідний запас надійності та покращує якість згладжування пульсацій напруги.

Таким чином, для модернізованої вітроенергетичної установки доцільно встановити 5 електролітичних конденсаторів 22000 мкФ, 63 В, з'єднаних паралельно, що утворюють батарею конденсаторів загальною ємністю 110000 мкФ. Це забезпечить стабільну роботу інвертора, зниження коливань напруги та підвищення надійності системи електропостачання.



Рис. 2.5 Конденсатор JML-22000/63V

2.9 Вибір апаратів захисту кола постійного струму

Для захисту кола постійного струму між контролером заряду та АКБ обрано автоматичний вимикач TOMZN TOB1Z-63 номінальним струмом 63А. та запобіжник плавкий e.fuse.NT00.63. Основним призначенням апаратів захисту є запобігання пошкодженню силового обладнання у випадку аварійних режимів роботи, таких як коротке замикання, перевантаження, внутрішні несправності інвертора або акумуляторної батареї. Розрахунковий струм кола постійного струму становить 20,8А. З урахуванням характеру роботи вітроенергетичної установки, що передбачає наявність змінного вітрового навантаження, пускових режимів інвертора та можливих короткочасних перевантажень, прийнято коефіцієнт запасу $k = 3$.

Розрахункове значення струму становить 62,4А. Приймається стандартний автоматичний вимикач номіналом 63А.



Рис. 2.6 Автоматичний вимикач TOMZN TOB1Z-63 та запобіжник плавкий e.fuse.NT00.63.

2.10 Підсумок модернізації вітроенергетичної установки на базі синхронної машини

У рамках проведеної модернізації вітроенергетичної установки на базі синхронної машини виконано вдосконалення структури силової частини перетворення енергії з метою підвищення стійкості електромеханічної системи, покращення якості електричної енергії та зниження динамічних навантажень на елементи установки.

Вихідна схема включала синхронний генератор, діодний випрямляч, проміжну ланку постійного струму та автономний інвертор. У модернізованому варіанті основну увагу приділено стабілізації ланки постійного струму (DC-шини) за рахунок застосування ємнісної фільтрації, що забезпечує зниження пульсацій напруги та покращення режимів роботи інвертора.

Пульсації напруги у ланці постійного струму описуються залежністю:

$$\Delta U_{dc} \approx \frac{I_{dc}}{C_{dc} \cdot f_r} \quad (2.27)$$

де:

C_{dc} — ємність конденсаторної ланки,

f_r — частота пульсацій випрямляча,

I_{dc} — струм ланки постійного струму.

Зменшення ΔU_{dc} призводить до зниження коливань потужності в інверторній частині та підвищення стабільності формування вихідної напруги.

Особливе значення в модернізованій системі має забезпечення стабільних параметрів вихідної електроенергії, зокрема частоти 50 Гц, що відповідає вимогам стандартної електричної мережі. Автономний інвертор формує напругу із заданою частотою:

$$f = 50 \text{ Гц}$$

що забезпечує коректну синхронізацію з навантаженням або мережею та виключає відхилення частоти, які негативно впливають на якість електроенергії та роботу споживачів.

Механічна частина системи описується рівнянням електромеханічного перетворення енергії:

$$P = \omega T$$

де:

ω — кутова швидкість ротора,

T — електромагнітний момент генератора.

Згладжування електричних пульсацій призводить до зменшення коливань електромагнітного моменту, що знижує вібраційні навантаження на валопровід та підвищує ресурс підшипникових вузлів.

Економічний ефект модернізації досягається за рахунок підвищення ККД перетворювальної частини та зменшення сумарних втрат енергії:

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{fe} + P_{conv}$$

Зменшення втрат у перетворювальній частині P_{conv} , а також підвищення стабільності режимів роботи системи призводять до зростання загального коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

У результаті модернізації забезпечується підвищення енергетичної ефективності установки, покращення якості вихідної напруги з частотою вітра 50 Гц, підвищення експлуатаційної надійності та зниження експлуатаційних витрат. Очікуваний приріст енергетичної ефективності становить близько 7–15% залежно від режимів вітрового потоку та параметрів навантаження.

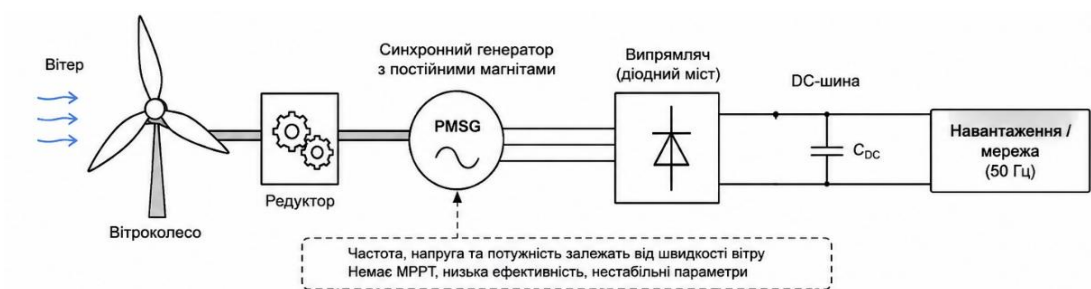


Рис. 2.7 Модель вітрогенераторної установки до модернізації

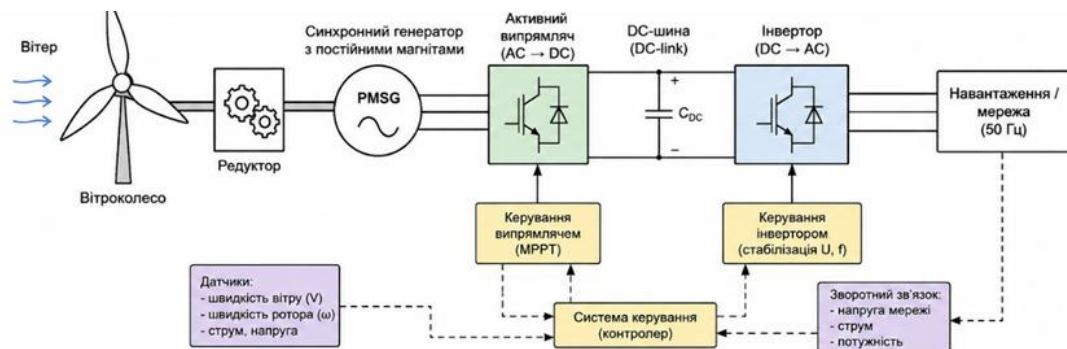


Рис. 2.8 Модель вітрогенераторної установка після модернізації

У роботі конструкція та електромагнітні параметри синхронного генератора не змінювалися. Проте модернізація силової частини позитивно вплинула на режими його роботи. Завдяки застосуванню стабілізованої DC-шини та акумуляторної батареї зменшилися коливання навантаження генератора, що призвело до більш рівномірного відбору потужності від вітротурбіни.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

У середовищі MATLAB/Simulink розроблено математичну модель модернізованої вітроенергетичної установки, яка описує процеси перетворення енергії від вітрового потоку до навантаження. Модель включає синхронний генератор, активний випрямляч, DC-шину, та інвертор. Проведене моделювання дозволило дослідити динамічні режими роботи системи, перевірити стабільність напруги DC-шини та підтвердити можливість формування вихідної напруги частотою 50 Гц при змінних параметрах вітрового потоку. математичну модель модернізованої вітроенергетичної системи. Електрична частина генератора описується рівнянням балансу потужностей:

$$P_{el} = U \cdot I$$

Для ланки постійного струму (DC-шини) динаміка напруги визначається:

$$C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{gen} - I_{inv} - I_{bat}$$

де

C_{dc} — ємність конденсаторної батареї,

U_{dc} — напруга DC-шини.

Інвертор формує вихідну напругу змінного струму з фіксованою частотою:

$$f = 50 \text{ Гц}$$

Система керування включає ПІ-регулятор, який забезпечує стабілізацію напруги DC-шини та підтримання заданих режимів роботи.

Отримана математична модель дозволяє аналізувати динаміку системи, оцінювати вплив змін швидкості вітру на електричні параметри та обґрунтовувати вибір параметрів силових елементів і системи керування.

Енергосиловий розрахунок параметрів вітротурбіни полягає у визначенні крутного моменту, що розвивається на роторі, та оцінці

потужності, яку турбіна відбирає з потоку вітру. Потужність вітротурбіни визначається за виразом:

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

де

P_m – механічна вихідна потужність турбіни Вт;

ρ - щільність повітря, кг/м³;

A - площа, омітається лопатями, м²;

$V_{\text{віт}}$ - швидкість вітру, м/с;

C_p - коефіцієнт використання енергії вітру;

Теоретичний максимум. Згідно Межі Беца, жодна вітротурбіна не може витягти більше:

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

Тобто 59,3% вітрового потоку. На практиці:

- сучасні великі вітротурбіни: 0,40 - 0,50.
- хороші промислові установки у оптимальному режимі: до 0,52 - 0,55.
- невеликі саморобні вітрогенератори: часто 0,20 - 0,35.

λ - відношення швидкості на кінці лопаті ротора до швидкості вітру;

β - кут нахилу лопаті (у градусах)

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^x - c_5 \right) \exp \left(\frac{c_6}{\lambda_i} \right)$$

де

$c_1 \dots c_6$ – константи;

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3}$$

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V_{\text{віт}}}$$

Якщо нам потрібно проектувати турбіну будь-якої потужності, необхідні параметри моделі турбіни.

Таблиця 3.1 - Параметри моделі турбіни

Параметр	Значення
λ	4,73
$C_{p \text{ вих}}(\lambda, \beta)$	0,131
$V_{\text{віт}}$	12
R	1,25
$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$	0,5; 116; 0,4; 0; 0,5; 21

Для різних типів установок характерні різні значення. Для багатолопастеві установки:

$$\lambda = 3; \beta = 0^\circ$$

Згідно з технічними характеристиками вітрогенератора Aeolos-H 1 kW частота обертання ротора становить 350 об/хв. Переводимо у радіани в секунду:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 350}{60} = 36,65 \text{ рад/с}$$

При потужності 1 кВт механічний момент на валу становить:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{1000}{36,65} = 27,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Отримане значення характеризує навантаження на вал синхронного генератора в номінальному режимі роботи.

Напруга генератора залежить від швидкості обертання та магнітного потоку:

$$E = 4,44fw\Phi$$

де E — ЕРС генератора; w — число витків; Φ — магнітний потік.

Кінетична потужність повітряного потоку:

$$P_{\text{кін}} = \frac{1}{2}\rho SV^3 = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3$$

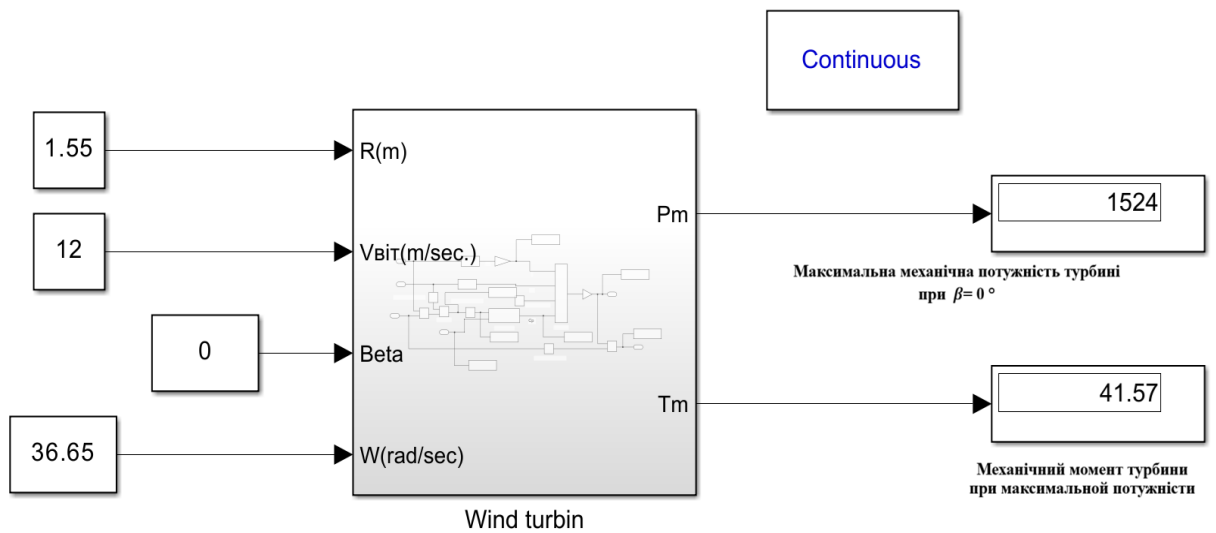


Рис. 3.1 Імітаційна модель вітрогенератора на базі синхронної машини розроблена у програмі MATLAB/Simulink

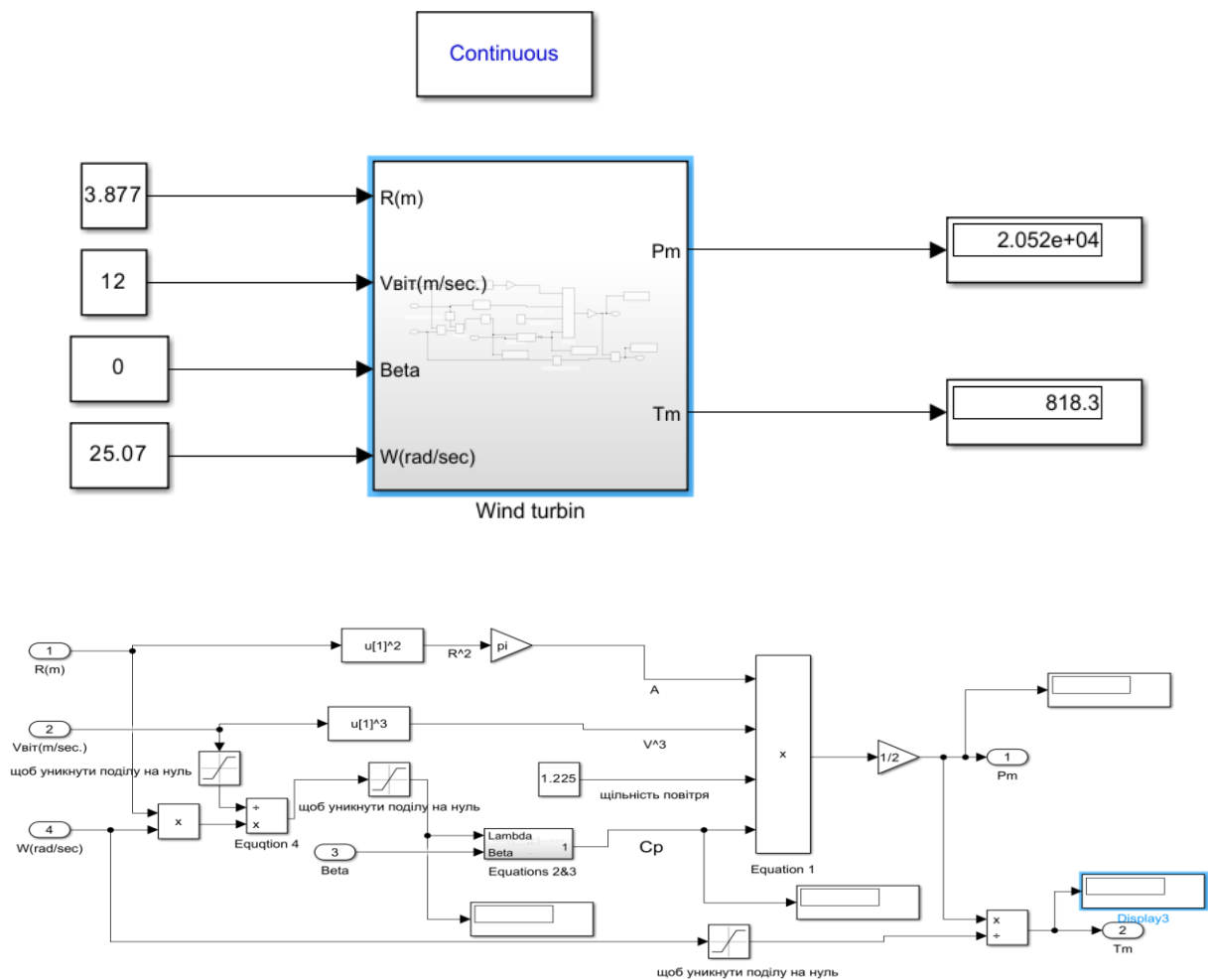


Рис. 3.2 Внутрішня структура імітаційної моделі турбіни

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

4.1 Загальні інвестиції

Для визначення економічного ефекту від запропонованої у дипломному проекті модернізації проводимо розрахунок витрат, якій складається з:

1. Витрати на придбання обладнання.
2. Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт.
3. Витрати на:
 - виконання монтажних робіт;
 - налагоджувальні роботи;
 - транспортні витрати.

Таблиця 4.1 - Розрахунок вартості обладнання

№	Найменування	Ціна, Грн.	Кількість	Вартість, грн.
1	Модуль SKM25GD125D	1400	1	1400
2	Контролер GreenChip W1500	5500	1	5500
3	АКБ LiFePO4 48 В 50 А·год	18000	1	18000
4	Інвертор 48 В 220 В, 1,5 кВт	10200	1	10200
5	Конденсатор JML-22000/63V	390	5	1950
6	ДС автомат 63 А	240	1	240
7	ДС запобіжник 40 А	200	1	200
Всього				37490

У межах виконання дипломної роботи розглядається модернізація існуючої вітроенергетичної установки на базі синхронної машини. При цьому слід зазначити, що сам вітрогенератор як готовий енергетичний об'єкт у розрахунок капітальних витрат не включається, оскільки він не є предметом проектування або придбання. Предметом економічного

розрахунку є виключно додаткове обладнання та технічні засоби, необхідні для модернізації існуючої установки.

Величина проектних капіталовкладень (S_i) за формулою:

$$S_i = K_{об} + K_{дм} + K_{н} \quad (4.1)$$

де

$K_{об}$ - сумарна вартість обладнання, необхідного для реалізації проекту;

$K_{дм}$ – витрати на монтажні роботи;

$K_{н}$ - витрати на налагоджувальні роботи;

Витрати на монтаж і наладку розраховуються за допомогою цін, преїскурантів, тарифів підприємств-перевізників та підприємств, які займаються монтажними і пусконаладжувальними роботами. Визначаємо ці витрати на рівні 10% від вартості обладнання.

$$S_i = 37490 + 3749 = 41239 \text{ грн.}$$

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати модернізованої вітроенергетичної установки включають витрати на технічне обслуговування, поточний ремонт, амортизацію обладнання та компенсацію втрат електроенергії у силових елементах. У зв'язку з використанням сучасних напівпровідникових перетворювачів та стабілізованої DC-ланки, експлуатаційні витрати знижуються порівняно з базовою схемою.

Технічне обслуговування (ТО):

- перевірка інвертора, DC-шини, з'єднань;
- підтяжка контактів, огляд конденсаторів;
- діагностика;

Приймаємо на рівні 10% від вартості обладнання

$$C_{обсл} \approx 4000 \text{ грн/рік}$$

Поточний ремонт / дрібні заміни:

- запобіжники
- клеми, кабелі

- дрібні електронні елементи

Приймаємо на рівні 10% від вартості обладнання

$$C_{\text{пр}} \approx 4000 \text{ грн/рік}$$

До модернізації через підвищені пульсації напруги в ланці постійного струму, додатковий нагрів силових елементів та нестабільні режими роботи перетворювального обладнання рекомендувалося виконувати профілактичний огляд електричної частини не рідше двох разів на рік. Після модернізації, завдяки встановленню конденсаторної батареї DC-шини, стабілізації напруги та зменшенню електричних навантажень на силові елементи, періодичність планового технічного обслуговування може бути знижена до одного разу на рік.

Річні витрати на технічне обслуговування визначаються:

$$C_{\text{ТО+repair}} = n \cdot C_1$$

де:

n — кількість профілактичних обслуговувань протягом року;

C_1 — вартість одного технічного обслуговування.

До модернізації:

$$C_{\text{ТО+repair old}} = 2 \cdot C_1$$

Після модернізації:

$$C_{\text{ТО+repair new}} = 1 \cdot C_1$$

Таким чином, витрати на планове технічне обслуговування зменшуються приблизно на 50%

$$\Delta C_{\text{ТО+repair}} = C_{\text{ТО+repair}} - C_{\text{ТО+repair}}'$$

4.3 Втрати електричної енергії в системі

У базовій конфігурації вітроенергетичної установки значні втрати електричної енергії виникали в силовій частині перетворення енергії, зокрема у випрямлячі, інверторі та ланці постійного струму. Основною

причиною втрат були пульсації напруги, гармонійні спотворення та нестационарний режим роботи перетворювачів.

До модернізації у вихідній схемі сумарні втрати електричної енергії оцінювались на рівні:

$$P_{loss,old} = P_{conv} + P_{cu} + P_{harm} \approx 18\%$$

де:

P_{conv} — втрати в перетворювачах,

P_{cu} — мідні втрати,

P_{harm} — втрати від гармонік.

Після впровадження стабілізованої DC-шини з ємнісною фільтрацією та оптимізованої системи керування втрати зменшуються до:

$$P_{loss,new} \approx 4\%$$

Для оцінки економічного ефекту від модернізації вітроенергетичної установки необхідно визначити річний виробіток електричної енергії, оскільки саме від нього залежить величина корисної енергії та відповідна грошова економія. Для малопотужної вітроенергетичної установки номінальною потужністю 1 кВт річний виробіток визначається за формулою:

$$E_{year} = P_{nom} \cdot t \cdot k = 1 \cdot 8760 \cdot 0,3 = 2628$$

де:

P_{nom} — номінальна потужність установки, кВт;

t - кількість годин у році (8760 год);

k - коефіцієнт використання потужності (0,25–0,35 для узбережжя морів).

Внаслідок модернізації втрати електроенергії зменшуються приблизно з 18% до 4%, тобто підвищення енергоефективності становить близько:

$$\Delta\eta \approx 14\%$$

Економія електроенергії:

$$E_{saved} = 2190 \cdot 0,14 \approx 368 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

Грошовий еквівалент економії за умови тарифу на електроенергію:

$$C_{el} = 368 \cdot 4,32 = 1589 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

4.4 Підвищення надійності електропостачання за рахунок акумуляторної батареї

У результаті модернізації до складу вітроенергетичної установки включено акумуляторну батарею, яка забезпечує накопичення надлишкової електричної енергії під час роботи вітрогенератора та її подальше використання в періоди відсутності або недостатньої швидкості вітру. За наявної ємності акумуляторної батареї система здатна забезпечувати живлення навантаження протягом приблизно 3-х годин.

Запас енергії акумулятора:

$$E_{\text{АКБ}} = U_{\text{АКБ}} \cdot C_{\text{АКБ}} = 48 \cdot 50 = 2400 \text{ Вт}\cdot\text{год}$$

Тривалість автономної роботи визначається за формулою:

$$t = \frac{E_{\text{АКБ}}}{P_{\text{н}}} = \frac{2,4}{0,8} = 3 \text{ год}$$

де:

t - час автономної роботи, год;

$E_{\text{АКБ}}$ — запас енергії акумуляторної батареї, кВт·год;

$P_{\text{н}}$ - потужність навантаження, 800 кВт. Для визначення часу автономної роботи акумуляторної батареї в розрахунках прийнято потужність навантаження 800 Вт. Таке значення обрано з урахуванням того, що номінальна потужність вітроенергетичної установки становить 1 кВт, однак у реальних умовах експлуатації генератор більшу частину часу працює не на максимальній потужності через змінний характер швидкості вітру.

Акумуляторна батарея ємністю 2,4 кВт·год забезпечує живлення навантаження потужністю 800 Вт протягом приблизно 3 годин. За умови щоденного використання накопиченої енергії річний час автономної роботи становить:

$$t_{\text{річне}} = 3 \cdot 365 = 1095 \text{ год/рік}$$

Обсяг електроенергії, який не потрібно брати із зовнішньої мережі:

$$E = t_{\text{річне}} \cdot P = 1095 \cdot 0,8 = 876 \text{ кВт/рік}$$

$$C_{\text{від АКБ}} = 876 \cdot 4,32 \approx 3784 \text{ грн/рік}$$

Таким чином, після модернізації споживач отримує не лише електроенергію безпосередньо від вітрогенератора, а й можливість використання накопиченої в акумуляторній батареї енергії, що забезпечує автономну роботу системи протягом до 3 годин навіть за повної відсутності вітру.

Термін окупності капіталовкладень визначається як співвідношення інвестицій та річних витрат на обслуговування к річної економії електроенергії:

$$T_{\text{ок}} = \frac{S_i}{E} = \frac{41239}{1589 + 8000 + 3784} = 3 \text{ роки}$$

Економія електричної енергії внаслідок модернізації є незначною. Основний ефект проявляється саме у зниженні витрат на обслуговування та підвищенні надійності роботи системи.

Проведена модернізація вітроенергетичної установки є технічно та економічно доцільною, оскільки дозволяє підвищити ефективність використання виробленої електричної енергії без заміни основного енергетичного обладнання — вітротурбіни та синхронного генератора.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

5.1 Основні небезпечні фактори

Охорона праці при експлуатації вітроенергетичної установки на базі синхронної машини спрямована на забезпечення безпечних умов роботи персоналу, попередження аварійних ситуацій та зниження ризиків впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Під час експлуатації вітрогенератора на персонал обслуговуючій устновку можуть впливати такі основні небезпечні фактори:

- наявність високої напруги змінного та постійного струму (понад 1000 В);
- рухомі механічні частини (лопаті ротора, валопровід);
- високі аеродинамічні навантаження та вібрації;
- електромагнітні поля;
- робота на висоті;
- ризик виникнення аварійних режимів у силовій електроніці.

5.2 Заходи електробезпеки

Електробезпека при експлуатації малопотужного вітроенергетичного агрегату забезпечується комплексом технічних і організаційних заходів, спрямованих на запобігання ураженню електричним струмом, пошкодженню обладнання та виникненню аварійних режимів у силовій частині системи.

У системі вітроенергетичної установки небезпечними є:

- ланка постійного струму (DC-шина) з підвищеною напругою;
- вихід інвертора змінної напруги 220/230 В, 50 Гц;
- силові напівпровідникові ключі (IGBT/діоди);
- конденсаторна батарея з накопиченою енергією;
- з'єднувальні кабельні лінії між блоками системи.

Особливу небезпеку становить конденсаторна ланка, яка зберігає заряд після відключення живлення.

Енергія, накопичена в конденсаторі, визначається:

$$W = \frac{1}{2} C_{dc} U_{dc}^2$$

Для забезпечення електробезпеки передбачено:

- автоматичне вимкнення живлення при перевантаженні та короткому замиканні;
- встановлення запобіжників у ланці DC;
- використання ізоляції кабелів з підвищеним класом напруги.
- заземлення всіх металевих частин установки;
- використання автоматичних вимикачів та запобіжників;
- контроль ізоляції силових кіл;
- блокування доступу до струмоведучих частин під час роботи;
- застосування захисного відключення при аварійних режимах.

Напруга ланки постійного струму визначається як:

$$U_{dc} = const$$

що вимагає постійного контролю ізоляції та стану конденсаторної батареї.

Система захисту забезпечує швидке відключення при перевищенні допустимого струму:

$$I > I_{nom} \Rightarrow \text{аварійне відключення}$$

Усі металеві неструмоведучі частини установки підлягають обов'язковому заземленню, що знижує ризик ураження струмом при пошкодженні ізоляції. Передбачено:

- захисне заземлення корпусу генератора;
- заземлення корпусу інвертора та випрямляча;
- об'єднання всіх металевих частин у систему вирівнювання потенціалів;
- підключення до загального контуру заземлення об'єкта.

Для виключення випадкового контакту з електричними частинами передбачено:

- закриті електротехнічні шафи з класом захисту не нижче IP54;
- ізольовані клемні з'єднання;
- маркування небезпечних зон високої напруги;
- конструктивне розділення силових і керуючих кіл.

Окрему небезпеку становить накопичена енергія в DC-шині. Для її зниження передбачено:

- розрядні резистори конденсаторів;
- автоматичне зниження напруги після відключення;
- контроль напруги перед проведенням обслуговування.

Час розряду визначається:

$$U_{dc}(t) = U_0 e^{-t/RC}$$

Під час технічного обслуговування:

- установка повністю знеструмлюється;
- перевіряється відсутність напруги;
- застосовується блокування повторного включення;
- роботи виконуються тільки кваліфікованим персоналом;
- використовуються засоби індивідуального захисту (діелектричні рукавички, інструмент з ізоляцією).

5.3 Механічна безпека

Під час експлуатації вітроенергетичної установки значну небезпеку становлять механічні фактори, пов'язані з обертанням ротора, дією вітрових навантажень, вібраціями конструкції та можливим руйнуванням окремих елементів установки. Основними джерелами механічної небезпеки є:

- обертові лопаті вітроколеса;
- вал генератора та рухомі елементи приводу;
- підшипникові вузли;
- опорна конструкція (щогла);
- елементи кріплення ротора та генератора;
- вітрові та вібраційні навантаження.

Лопаті вітрогенератора під час роботи можуть досягати значної периферійної швидкості, що створює небезпеку травмування людей та пошкодження сторонніх предметів. Для запобігання нещасним випадкам передбачено:

- встановлення вітрогенератора на безпечній висоті;
- обмеження доступу сторонніх осіб до зони обертання ротора;
- виконання технічного обслуговування лише після повної зупинки ротора;
- встановлення попереджувальних знаків безпеки;
- механічне блокування ротора під час проведення ремонтних робіт.

При збільшенні швидкості вітру виникає небезпека перевищення допустимих механічних навантажень на лопаті та елементи конструкції.

Для запобігання руйнуванню конструкції застосовуються:

- автоматичне обмеження потужності при сильному вітрі;
- система аварійного гальмування;
- відключення навантаження при перевищенні допустимих параметрів;
- запас міцності несучих конструкцій.

Одним із факторів, що впливають на надійність вітроенергетичної установки, є механічні вібрації. Причинами виникнення вібрацій можуть бути:

- дисбаланс ротора;
- нерівномірність вітрового потоку;
- зношення підшипників;
- послаблення кріплень конструкції;
- пульсації електромагнітного моменту генератора.

Для зниження вібрацій передбачено:

- статичне та динамічне балансування ротора;
- контроль технічного стану підшипників;
- періодичну перевірку кріплень;
- використання вібродемпфуючих елементів.

Зменшення вібрацій сприяє підвищенню ресурсу установки та зниженню ризику аварійних відмов.

Опорна щогла та елементи кріплення повинні забезпечувати надійну роботу установки при максимальних розрахункових навантаженнях. Для цього передбачено:

- використання металоконструкцій із необхідним запасом міцності;
- антикорозійний захист конструктивних елементів;
- надійне фундаментне кріплення;
- регулярний контроль стану зварних і болтових з'єднань.

Особлива увага приділяється місцям кріплення генератора та ротора, оскільки саме вони сприймають основні механічні навантаження.

5.4 Безпека під час технічного обслуговування

Технічне обслуговування, ремонтні та налагоджувальні роботи на вітроенергетичній установці дозволяється виконувати виключно працівникам, які пройшли відповідне навчання, інструктаж з охорони праці, перевірку знань правил технічної експлуатації електроустановок споживачів та мають групу з електробезпеки не нижче III.

До виконання робіт допускається лише кваліфікований обслуговуючий персонал, який ознайомлений з конструкцією вітрогенератора, принципом роботи силового електрообладнання та вимогами безпеки під час експлуатації електроустановок.

Проведення технічного обслуговування сторонніми особами, які не мають відповідної підготовки та допуску до виконання електротехнічних робіт, забороняється. Перед початком робіт установка повинна бути повністю знеструмлена, ротор механічно заблокований, а відсутність напруги на струмоведучих частинах підтверджена відповідними вимірюваннями.

Дотримання зазначених вимог дозволяє мінімізувати ризик ураження електричним струмом, механічного травмування та виникнення аварійних

ситуацій під час експлуатації й обслуговування вітроенергетичної установки.

Перед виконанням робіт необхідно:

- повністю зупинити ротор;
- зафіксувати його механічним блокувальним пристроєм;
- відключити електроживлення;
- переконатися у відсутності можливості самовільного запуску установки під дією вітру.

Обслуговування допускається виконувати лише після перевірки надійності блокування ротора та відсутності небезпечних механічних рухів.

Оскільки елементи вітрогенератора можуть розміщуватися на висоті, обов'язковим є:

- використання страхувальних систем;
- застосування засобів індивідуального захисту (каски, страхувальні пояси);
- допуск до робіт лише для персоналу з відповідною кваліфікацією;
- виконання робіт за нарядом-допуском.

5.5 Пожежна та аварійна безпека

Пожежна безпека вітроенергетичної установки є одним із найважливіших аспектів безпечної експлуатації обладнання. Наявність електричних кіл постійного та змінного струму, силових напівпровідникових перетворювачів, конденсаторної батареї та кабельних ліній створює потенційну небезпеку виникнення пожежі внаслідок коротких замикань, перевантажень, перегріву або пошкодження ізоляції.

Основні причини виникнення пожежі

Найбільш імовірними причинами виникнення пожежонебезпечних ситуацій є:

- короткі замикання в силових колах генератора, випрямляча або інвертора;
- перевантаження силових кабелів;
- перегрів силових напівпровідникових елементів інвертора;

- пошкодження ізоляції провідників;
- виникнення електричної дуги в місцях неякісних контактних з'єднань;
- вихід з ладу конденсаторів ланки постійного струму;
- атмосферні перенапруги та прямі удари блискавки;
- перегрів підшипникових вузлів генератора.

Для запобігання виникненню пожежі в електричних колах передбачаються:

- автоматичні вимикачі змінного струму;
- автоматичні вимикачі та запобіжники постійного струму;
- захист інвертора від перевантаження;
- контроль максимально допустимого струму навантаження;
- аварійне вимкнення обладнання при виникненні короткого замикання.

Автоматичне відключення пошкодженої ділянки дозволяє локалізувати аварію та запобігти загорянню обладнання.

Вітрогенератор належить до об'єктів, що піддаються підвищеному ризику ураження блискавкою. Для забезпечення пожежної безпеки необхідно передбачити:

- систему зовнішнього блискавкозахисту;
- заземлення металевої щогли;
- встановлення обмежувачів перенапруг (SPD) на стороні постійного та змінного струму;
- підключення всіх металевих конструкцій до контуру заземлення.

Наявність блискавкозахисту значно знижує ймовірність пошкодження силового обладнання та виникнення пожежі внаслідок атмосферних перенапруг.

Під час роботи інвертора, випрямляча та генератора виділяється тепла енергія, яка може призвести до перегріву елементів системи.

Для забезпечення пожежної безпеки застосовуються:

- природне або примусове охолодження силових елементів;
- контроль температури напівпровідникових ключів;

- використання матеріалів із необхідним класом вогнестійкості;
- періодичний контроль стану контактних з'єднань.

Особлива увага приділяється конденсаторам ДС-шини, перегрів яких може призвести до їх руйнування та загоряння.

Кабельна продукція повинна відповідати вимогам пожежної безпеки та мати:

- негорючу або важкогорючу ізоляцію;
- необхідний запас по допустимому струму;
- механічний захист від пошкоджень;
- надійну ізоляцію в місцях з'єднань.

Прокладання кабелів повинно виключати можливість їх перегріву та механічного пошкодження.

Поблизу обладнання повинні знаходитися первинні засоби пожежогасіння:

- порошкові вогнегасники;
- вуглекислотні вогнегасники;
- засоби для відключення електроживлення в аварійній ситуації.

Застосування води для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою, забороняється.

Для підтримання належного рівня пожежної безпеки необхідно:

- проводити періодичні огляди електрообладнання;
- контролювати стан ізоляції кабелів;
- перевіряти справність захисної автоматики;
- своєчасно виконувати технічне обслуговування;
- не допускати експлуатацію обладнання з ознаками перегріву або пошкодження.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було розглянуто та досліджено процес модернізації вітроенергетичної установки на базі синхронної машини з метою підвищення енергоефективності, покращення якості електричної енергії та підвищення надійності роботи системи. Проаналізовано існуючі схеми побудови вітроенергетичних установок та виявлено основні недоліки базової структури, зокрема наявність значних пульсацій у ланці постійного струму, втрати в перетворювальних елементах та недостатню стабільність вихідних параметрів електроенергії. Запропоновано модернізовану структуру силової частини системи, яка передбачає використання стабілізованої DC-шини з ємнісною фільтрацією та покращеними режимами роботи інвертора. Це дозволило зменшити пульсації напруги та струму, а також покращити умови роботи синхронної машини. Проведені розрахунки параметрів системи керування показали, що застосування ПІ-регулятора забезпечує стабілізацію напруги ланки постійного струму та підтримання заданої частоти вихідної напруги 50 Гц, що відповідає вимогам стандартної електричної мережі. Проведено математичне та імітаційне моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило перевірити працездатність запропонованої структури вітроенергетичної установки на базі синхронної машини, підтвердити коректність роботи системи стабілізації напруги DC-шини та формування вихідної напруги змінного струму з частотою 50 Гц. Результати моделювання показали зменшення пульсацій напруги в ланці постійного струму, покращення динамічної стійкості системи, а також зниження коливань електромагнітного моменту синхронної машини.

Економічний аналіз показав, що основний ефект модернізації досягається за рахунок зменшення втрат електроенергії, зниження витрат на технічне обслуговування та підвищення ресурсу обладнання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головка, В. М. Вітроенергетика: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 88 с.
2. Обухов С.Г. Вітроенергетичні установки малої потужності. Технічні характеристики, моделювання, раціональний вибір. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. №3. 88 с.
3. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру: навч. посіб. / С. В. Сиротюк, В.М. Боярчук, В.П. Гальчак - Львів: «Магнолія 2006», 2018 - 182с.
4. Приймак Б. І. Векторне керування асинхронним генератором з підвищеним коефіцієнтом корисної дії. Вісник Вінницького політехнічного інституту. Вінниця : ВПІ. 2021. №1. С. 49-56.
5. Беззуб М. А., Бялобржеський О. В., Тодоров О. В., Рева І. В. Дослідження функціонування послідовного силового активного фільтра за умови різних показників відхилення якості електричної енергії. Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. Маріуполь : ПДТУ. 2021. Вип. 43. С. 129-138.
6. Вітроенергетика / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2023. 135 с.
7. Бурбело М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2023. 159 с. URL : http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Burbelo_2021_102.pdf (дата звернення 26.12.2024).
8. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. Київ: НТУУ "КПІ", 2011. 421 с. Електронний ресурс.. Режим доступу: https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf

9. Цідило І. М, Ковальський Імітаційне моделювання засобами matlab у структурі підготовки інженера-педагога. Наукові записки. Серія Педагогіка №1, 2013. С.31-40

10. Мазнєв Г.Є., Турченко М.М., Щетіпін М.Д. Економічне обґрунтування інженерних рішень в сфері АПК: /Навч. посібник. – Харків: ХДТУСГ, 2001.- 401с.

11. Петрович Й.М., Кіт А.Ф., Кулішов В.В. та ін. Економіка підприємства: Підручник / За загальною редакцією Й.М. Петровича. – Львів: „Магнолія плюс”, видавець В.М. Піча.- 2004.-680с.

12. Зеркалов Д.В. Охорона праці. навч. посібник. К.: «Основа». 2015. 348 с.

13. Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зацарний В.В. та ін. Основи охорони праці: підручник. – К.: Основа, 2011. – 474 с.

14. Методичні вказівки до виконання розділу „Охорона праці“ в дипломних проектах (роботах) бакалаврів інституту електроенергетики / В.І. Голінько, В.Ю. Фрундін, Ю.І. Чеберячко, М.Ю. Іконніков. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2012. – 8 с.