

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Моделювання роботи вітроенергетичної
установки для живлення електричної мережі
побутових споживачів”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Олег ДАЛДАНОВ
« ____ » _____2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Далданова Олега Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Моделювання роботи вітроенергетичної установки для живлення електричної мережі побутових споживачів

Modelling the operation of a wind power plant for power supply to the electricity grid of household consumers

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, к. т. н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою даної роботи є дослідження роботи вітроенергетичної установки для живлення електричної мережі побутових споживачів шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання. Завдання роботи: 1. Здійснити дослідження функціонування DC-мікромереж. 2. Дослідити методи та системи пошуку максимуму потужності у вітроенергетичних установках. 3. Створити математичну модель DC-мережі з малопотужною вітровою установкою. 4. Змоделювати систему малої вітроенергетичної установки з DC-мережею за допомогою середовища MATLAB Simulink..

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>4.10.2024</i>	
2	<i>Аналітичний огляд питання застосування вітроенергетичних установок для живлення електричних мереж побутових споживачів</i>	<i>12.10.2024</i>	
3	<i>Теоретичне дослідження роботи вітроенергетичної установки для живлення побутової електричної мережі</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Комп'ютерне моделювання роботи вітроенергетичної установки для живлення мережі побутових споживачів</i>	<i>05.11. 2024</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>18.11. 2024</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>23.11. 2024</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.11. 2024</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11. 2024</i>	

Дата видачі завдання
« ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання
« ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Далданов О. О. Моделювання роботи вітроенергетичної установки для живлення електричної мережі побутових споживачів

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024 р.

Метою даної роботи є дослідження роботи вітроенергетичної установки для живлення електричної мережі побутових споживачів шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Дослідження включало в себе вирішення таких питань, як проведення аналітичного огляду питання застосування вітроенергетичних установок для живлення електричних мереж побутових споживачів, теоретичне дослідження роботи вітроенергетичної установки для живлення побутової електричної мережі, комп'ютерне моделювання роботи вітроенергетичної установки для живлення мережі побутових споживачів.

В ході дослідження проаналізовано різноманітні стратегії керування потужністю вітроенергетичних установок. Особливу увагу приділено алгоритмам пошуку та утримання точки максимальної потужності (MPPT - Maximum Power Point Tracking), які забезпечують оптимальний режим роботи вітрогенератора при змінних швидкостях вітру.

Аналіз функціонування DC-DC перетворювача зосередився на дослідженні трьох ключових параметрів: вихідної напруги, струму та потужності при керуванні за допомогою алгоритму P&O MPPT.

Ключові слова: вітроенергетична установка, мікромережа, комп'ютерне моделювання

THE SUMMARY

Daldanov O. O. Modelling the operation of a wind power plant for power supply to the electricity grid of household consumers

The purpose of this work is to study the operation of a wind power plant for supplying the electrical network of household consumers by means of computer simulation modeling.

The study included solving such issues as conducting an analytical review of the issue of using wind power plants for supplying electrical networks of household consumers, theoretical research of the operation of a wind power plant for supplying the electrical network of household consumers, computer modeling of the operation of a wind power plant for supplying the electrical network of household consumers.

During the study, various power control strategies for wind power plants were analyzed. Particular attention was paid to the algorithms for searching and holding the maximum power point (MPPT - Maximum Power Point Tracking), which provide the optimal mode of operation of the wind generator at variable wind speeds.

The analysis of the functioning of the DC-DC converter focused on the study of three key parameters: output voltage, current and power when controlled using the P&O MPPT algorithm.

Keywords: wind power plant, microgrid, computer modeling

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ	12
1.1 Аналітичний огляд сучасних мікромереж з ВЕУ	12
1.2 Аналіз роботи мереж з ВЕУ в ізольованому режимі.....	19
1.3 Аналітичний огляд малих вітрових турбін.....	23
1.4 Аналіз конструкції малих вітрових турбін	27
Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ПОБУТОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	36
2.1 Дослідження процесу генерації електричної енергії в мікромережі ВЕУ	36
2.2 Дослідження роботи автономної ВЕУ в мікромережах	39
2.3 Технічні характеристики та вибір місця розміщення малої вітрової турбіни	43
2.4 Малі вітрогенератори на основі СГПМ	49
2.5 Використання МРРТ в малих вітрових турбінах.....	60
Висновки до розділу	68
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ МЕРЕЖІ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ.....	70
3.1 Математична модель ВЕУ для живлення мережі побутових споживачів	70
3.1.1. Аеродинамічна модель вітрової турбіни.	72
3.1.2. Математична модель СГПМ	75
3.1.3. Математична модель силової електроніки ВЕУ	77

3.1.4. Модель перетворювача змінного струму в постійний	78
3.1.5. Модель підвищувального перетворювача постійного струму в постійний	79
3.2 Алгоритми МРРТ та Р&О	83
3.3 Загальний опис комп'ютерної моделі мережі ВЕУ	90
3.4 Результати комп'ютерного моделювання мережі ВЕУ	93
Висновки до розділу	108
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	110
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	118

ВСТУП

Актуальність теми. У світлі нагальних викликів сьогодення – від деградації довкілля до стрімкого виснаження традиційних енергоресурсів та невинно зростаючих енергетичних потреб людства – альтернативна енергетика набуває все більшого поширення. Сонячні панелі, вітрогенератори та інші екологічно чисті технології стають невід'ємною частиною глобального енергетичного ландшафту.

Втім, природа відновлюваних джерел енергії створює певні технічні складнощі: їхня продуктивність безпосередньо залежить від мінливих природних факторів - інтенсивності сонячного випромінювання, сили вітру чи інших погодних умов. Це породжує необхідність модернізації наявної інфраструктури електропостачання.

Трансформація традиційних енергетичних мереж потребує впровадження інноваційних технологічних рішень. Серед них особливу увагу привертає концепція розумних мікромереж (smart microgrids), які здатні ефективно поєднувати класичні та відновлювані джерела енергії. Такі системи використовують передові технології керування, накопичення енергії та розподіленої генерації, що дозволяє оптимізувати енергопостачання та підвищити надійність мережі.

Мікромережі також сприяють децентралізації енергетичної системи, що робить її більш стійкою до збоїв та природних катаклізмів. Вони можуть працювати як у складі загальної мережі, так і автономно, забезпечуючи безперебійне постачання електроенергії споживачам навіть у разі аварій у центральній мережі.

Сучасні мікромережі являють собою інтелектуальні енергетичні системи локального масштабу, які вирізняються гнучкістю в режимах функціонування - вони можуть як взаємодіяти з централізованою електромережею, так і працювати автономно. За типом струму їх поділяють

на три основні категорії: системи постійного струму, змінного струму та гібридні конфігурації, що поєднують обидва типи.

Особливу увагу привертають мікромережі постійного струму, які зарекомендували себе як ефективне рішення для живлення сучасної електроніки та побутової техніки. Вони органічно інтегрують системи накопичення енергії з розподіленими генераторами, забезпечуючи стабільне електропостачання широкого спектру пристроїв. До них належать не лише освітлювальні LED-системи та побутова електроніка (телевізори, комп'ютери, ноутбуки, планшети, смартфони), але й зарядні станції для електротранспорту.

Важливою перевагою мікромереж постійного струму є відсутність необхідності в багаторазовому перетворенні струму, що підвищує загальну енергоефективність системи. Більшість сучасних електронних пристроїв працює саме на постійному струмі, тому пряме живлення від такої мікромережі зменшує втрати енергії при перетворенні.

У контексті даного дослідження розглядається специфічний тип мікромережі постійного струму, де головним джерелом генерації виступає мала вітрова турбіна. Такі системи особливо актуальні для регіонів з хорошим вітровим потенціалом та можуть забезпечувати екологічно чисте електропостачання як для окремих будівель, так і для невеликих спільнот.

В сучасному світі, де дедалі більшого поширення набувають цифрові технології та енергоефективні рішення, системи постійного струму демонструють значні переваги порівняно з традиційними мережами змінного струму. Це особливо помітно у контексті стрімкого розвитку розподіленої енергетики, де ключову роль відіграють акумуляторні системи накопичення енергії, електричний транспорт та енергоощадне обладнання.

Використання постійного струму дозволяє суттєво оптимізувати процеси енергоперетворення, адже більшість сучасних пристроїв - від фотоелектричних панелей до LED-освітлення та цифрової техніки - природно працюють саме на постійному струмі. Це усуває необхідність багаторазових

перетворень між постійним та змінним струмом, які неминуче супроводжуються втратами енергії.

Крім того, технології постійного струму забезпечують кращі можливості для передачі електроенергії на відстань, що особливо важливо для розподілених енергосистем. Сучасні високовольтні лінії постійного струму (HVDC) демонструють менші втрати при передачі порівняно з лініями змінного струму аналогічної потужності.

З економічної точки зору, перехід на системи постійного струму також виявляється вигідним рішенням. Зменшення кількості перетворювальних пристроїв знижує як початкові капітальні витрати на обладнання, так і подальші експлуатаційні витрати. Додатково, спрощення системи підвищує її надійність та зменшує витрати на технічне обслуговування.

Такі переваги роблять технології постійного струму особливо привабливими для створення сучасних енергоефективних будівель, де інтегруються системи розумного керування кліматом (HVAC), відновлювані джерела енергії та передове цифрове обладнання.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження роботи вітроенергетичної установки для живлення електричної мережі побутових споживачів шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Здійснити дослідження функціонування DC-мікромереж.
2. Дослідити методи та системи пошуку максимуму потужності у вітроенергетичних установках.
3. Створити математичну модель DC-мережі з малопотужною вітровою установкою.
4. Змоделювати систему малої вітроенергетичної установки з DC-мережею за допомогою середовища MATLAB Simulink.

Об'єкт дослідження – процеси генерації електричної енергії з енергії вітрового потоку та її подальшої дистрибуції.

Предмет дослідження – DC-мікромережа з інтегрованою малопотужною вітроенергетичною установкою.

Наукова новизна отриманих результатів: удосконалено методологію моделювання електричної мережі, що включає вітроенергетичну установку із синхронним генератором на постійних магнітах, систему випрямлення на основі діодного мосту та DC-DC перетворювач підвищувального типу.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені в роботі комп'ютерні імітаційні моделі дозволяють проводити аналіз режимів роботи мікромереж з вітроенергетичними установками, що використовуються для живлення побутових споживачів.

Загальна характеристика наукової роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 120 сторінок. Основна частина викладена на 110 сторінках друкованого тексту, містить 44 рисунки. Список використаних джерел містить 21 джерело та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

1.1 Аналітичний огляд сучасних мікромереж з ВЕУ

Системи мікромереж, що функціонують на постійному струмі, здобули визнання як надійне технологічне рішення в енергетиці. Вони ефективно інтегрують акумуляторні системи накопичення енергії та децентралізовані генеруючі потужності для живлення широкого спектру сучасних пристроїв. До таких споживачів належать енергоефективні LED-освітлювальні системи, зарядні станції для електротранспорту, різноманітна обчислювальна техніка (персональні комп'ютери, портативні пристрої), побутова електроніка (телевізійні приймачі, смартфони), офісне обладнання та інші пристрої, що працюють від постійного струму.

Важливо зазначити, що такі мікромережі мають суттєві переваги порівняно з традиційними системами змінного струму, оскільки вони зменшують втрати при перетворенні енергії. Це особливо актуально, враховуючи що більшість сучасних електронних пристроїв внутрішньо працюють на постійному струмі. Крім того, мікромережі постійного струму краще інтегруються з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі та вітрогенератори, які природно виробляють постійний струм.

В контексті зростаючої електрифікації транспорту та розвитку концепції розумних будинків, такі мікромережі набувають все більшого значення для створення енергоефективної та екологічно чистої інфраструктури майбутнього.

Хоча історично склалося, що дослідницька спільнота концентрувала свою увагу на мікромережах змінного струму через накопичений досвід роботи з такими системами, сучасні досягнення у галузі силової електроніки

та стрімкий розвиток обчислювальних систем реального часу відкрили нові перспективи для технологій постійного струму. Ці інновації дозволили розширити функціональність систем постійного струму далеко за межі простого контролю.

Особливої актуальності технології постійного струму набувають у контексті масштабних промислових застосувань. Серед ключових галузей впровадження можна виділити:

- центри обробки даних з їх зростаючими потребами в надійному та ефективному електропостачанні;
- сучасні телекомунікаційні комплекси;
- інфраструктуру швидкісної зарядки для електромобільного транспорту;
- енергоефективні будівлі з нульовим рівнем споживання від зовнішньої мережі;
- електрифіковані залізничні системи;
- морський транспорт з електричною тягою.

Варто зазначити, що архітектура сучасних мікромереж постійного струму часто базується на модульному принципі, де кілька наномереж об'єднуються в єдину систему. Така структура забезпечує підвищену надійність, гнучкість та ефективність використання енергоресурсів. Крім того, модульний підхід спрощує інтеграцію відновлюваних джерел енергії та систем накопичення енергії, що є критичним для забезпечення стабільного електропостачання та оптимізації енергоспоживання.

Технології постійного струму також демонструють значні переваги в контексті енергоефективності, оскільки вони мінімізують кількість необхідних перетворень енергії, що особливо важливо для систем з високим рівнем цифровізації та автоматизації.

На відміну від традиційних мереж змінного струму, системи постійного струму мають суттєві технічні переваги завдяки відсутності ряду фундаментальних проблем. Зокрема, в таких системах повністю усувається

необхідність контролю реактивної потужності та підтримки частотної синхронізації, що значно спрощує їх експлуатацію та підвищує надійність.

Відсутність змінної частоти в системах постійного струму також призводить до елімінації низки небажаних фізичних явищ, таких як:

- скін-ефект (витіснення струму до поверхні провідника)
- ефект близькості (взаємний вплив провідників)
- проблеми з раптовими стрибками струму
- спотворення, пов'язані з вищими гармоніками

Додатковою перевагою систем постійного струму є підвищений рівень безпеки для обслуговуючого персоналу та обладнання через зменшення інтенсивності електромагнітних полів. Це особливо важливо в умовах зростаючої щільності розміщення електронного обладнання та підвищених вимог до електромагнітної сумісності.

Варто також відзначити, що системи постійного струму демонструють кращу енергоефективність завдяки відсутності втрат на перемагнічування в трансформаторах та зменшенню втрат у провідниках через відсутність скін-ефекту. Це робить їх особливо привабливими для застосування в центрах обробки даних, де енергоефективність є критичним фактором експлуатаційних витрат.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії з системами постійного струму має значні технологічні переваги. Особливо ефективним є підключення фотоелектричних панелей та паливних елементів, оскільки ці джерела природно генерують постійний струм, що усуває потребу в додаткових перетворювачах.

Для інших типів генераторів відновлюваної енергії, таких як вітрові турбіни, хвильові електростанції та газотурбінні установки, використання систем постійного струму також забезпечує підвищення загальної ефективності. Це досягається завдяки спрощенню процесу перетворення енергії - замість послідовного застосування двох перетворювачів (AC/DC та DC/AC) достатньо використовувати лише один випрямляч для отримання

постійного струму.

Така оптимізація силової електроніки призводить до:

- зменшення капітальних витрат на обладнання;
- підвищення надійності системи через зменшення кількості компонентів;
- скорочення втрат при перетворенні енергії;
- спрощення системи керування та моніторингу.

Крім того, системи постійного струму забезпечують більш стабільне накопичення енергії в акумуляторних батареях та інших накопичувачах, що особливо важливо для згладжування нерівномірності генерації від відновлюваних джерел. Це дозволяє створювати більш надійні та енергоефективні гібридні системи електропостачання.

Впровадження систем постійного струму дозволяє оптимізувати архітектуру електричних мереж шляхом усунення надлишкових етапів перетворення енергії. Це призводить до спрощення загальної структури системи та суттєвого зниження втрат при передачі та перетворенні електроенергії.

Однак, попри значні переваги, технології постійного струму стикаються з низкою викликів та обмежень:

1. Недостатня технологічна зрілість окремих компонентів та рішень порівняно з системами змінного струму, що мають більш ніж столітню історію розвитку.

2. Відсутність уніфікованої нормативно-технічної бази та загальноприйнятих стандартів, що ускладнює проектування та експлуатацію таких систем.

3. Проблеми стабільності, викликані невідповідністю імпедансу між компонентами системи:

- фільтри з легким демпфуванням на стороні генерації;
- жорстко регульовані перетворювачі потужності на стороні споживання.

4. Потреба у розробці та впровадженні специфічних методів заземлення, що відрізняються від традиційних рішень для мереж змінного струму.

5. Необхідність розвитку спеціалізованої системи захисту від коротких замикань та перевантажень, враховуючи особливості поведінки постійного струму.

Для подальшого розвитку технологій постійного струму необхідно зосередити дослідницькі зусилля на вирішенні цих проблем, що дозволить повною мірою реалізувати потенціал таких систем у майбутньому.

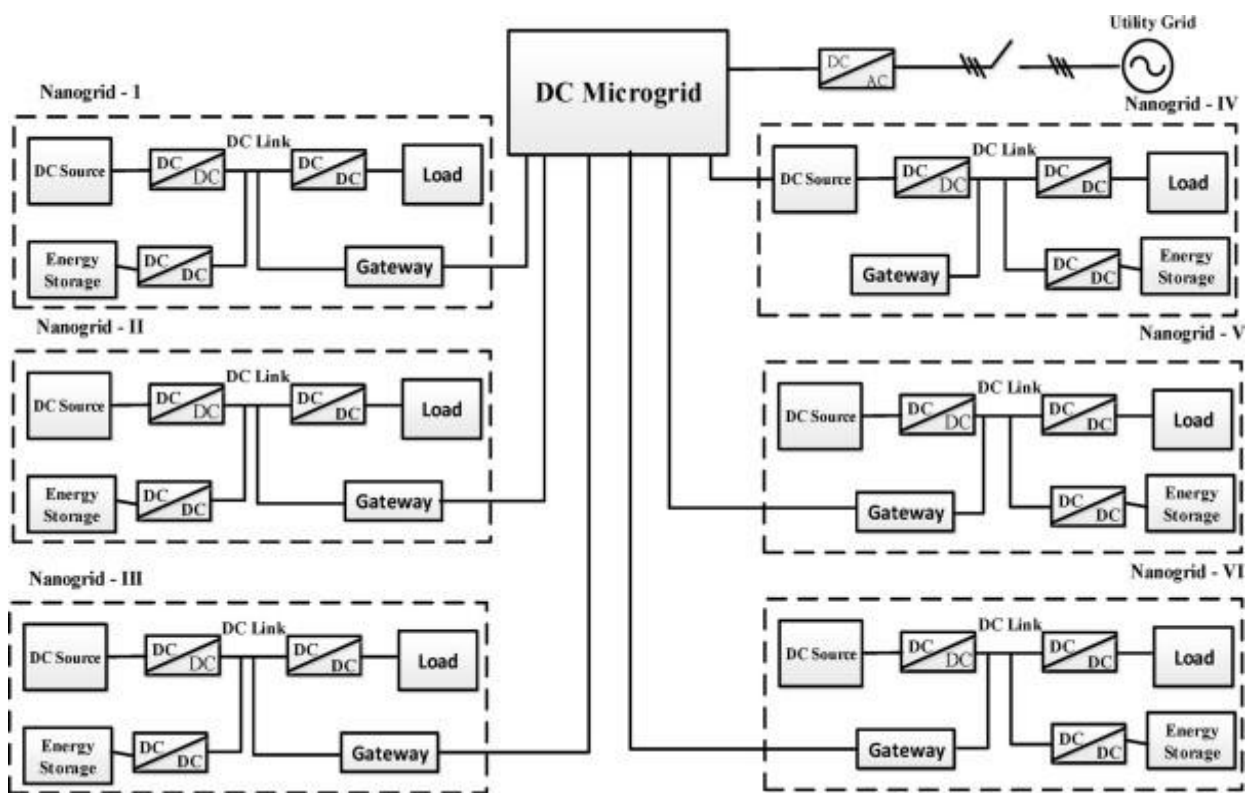


Рис. 1.1. Структурна схема мікромережі постійного струму, утворена із наномереж

Представлена схема мікромережі постійного струму з вітрогенератором (рис. 2.2) демонструє інтеграцію ключових компонентів сучасної системи електропостачання. У центрі системи знаходиться вітрова турбіна, що перетворює кінетичну енергію вітру в електричну.

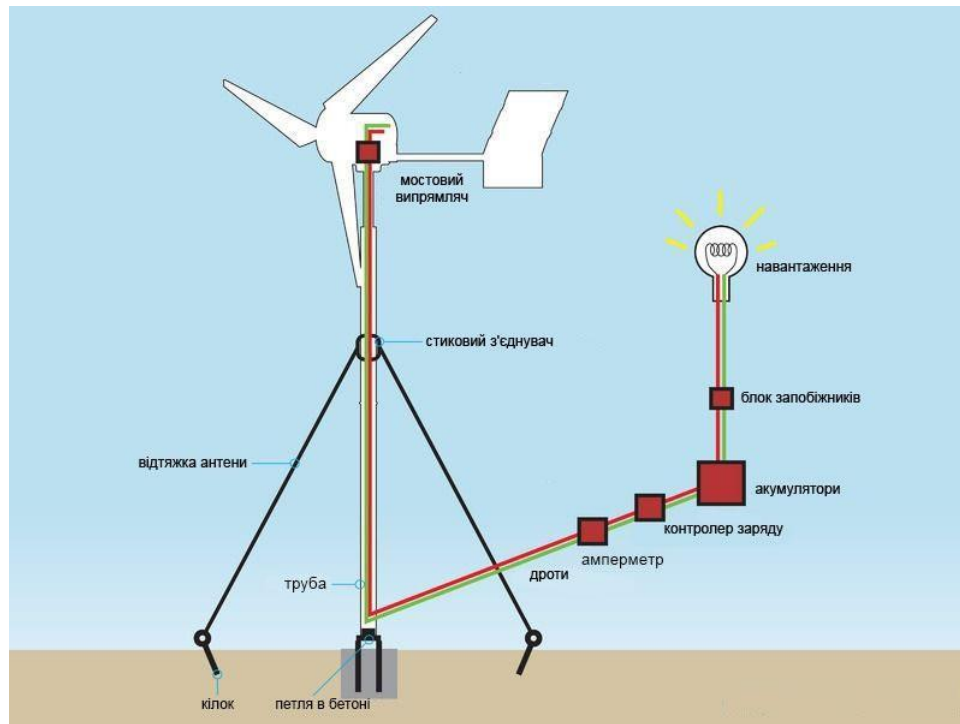


Рис. 1.2. Вітрова турбіна мікромережі постійного струму

Ефективне керування виробленою енергією забезпечується комплексом обладнання, що включає:

- силові електронні перетворювачі, які оптимізують параметри електроенергії;
- контролер відбору максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT), що забезпечує оптимальний режим роботи вітрогенератора при змінних швидкостях вітру;
- систему управління потоками енергії між джерелом та навантаженням.

Важливо зазначити, що контролер MPPT відіграє критичну роль у підвищенні ефективності системи, оскільки він динамічно адаптує робочу точку вітрогенератора відповідно до поточних умов вітру та потреб навантаження. Це дозволяє максимізувати виробіток енергії при різних швидкостях вітру та забезпечити стабільне електропостачання споживачів.

Така архітектура системи також передбачає можливість інтеграції з накопичувачами енергії (наприклад, акумуляторними батареями) для згладжування нерівномірності генерації та забезпечення безперебійного

живлення навантаження при недостатній швидкості вітру.

Процес перетворення енергії у вітрогенераторі відбувається в декілька етапів. Спочатку аеродинамічні лопаті ротора взаємодіють з потоком вітру, трансформуючи його кінетичну енергію в механічну енергію обертального руху. На наступному етапі ця механічна енергія передається до електричного генератора через систему валів та передач, де відбувається її перетворення в електричну енергію.

Ефективність вироблення енергії суттєво залежить від конструктивних особливостей вітроустановки:

- аеродинамічний профіль лопатей;
- геометричні параметри ротора;
- кількість лопатей;
- кут їх встановлення.

Сучасні вітрогенератори оснащуються системами адаптивного керування, які дозволяють оптимізувати процес генерації при змінних швидкостях вітру. Ці системи включають:

- механізми повороту лопатей для регулювання кута атаки;
- пристрої орієнтації гондоли за напрямком вітру;
- електронні системи керування потужністю.

Завдяки такому комплексному підходу до управління, вітрові турбіни здатні ефективно працювати в широкому діапазоні швидкостей вітру, забезпечуючи максимально можливий виробіток енергії в конкретних умовах експлуатації. При цьому враховуються не лише енергетичні параметри, але й механічні навантаження на конструкцію, що забезпечує тривалий термін служби обладнання.

У процесі дослідження здійснено комплексний аналіз функціонування автономних мікромереж постійного струму з інтегрованими вітроенергетичними установками малої потужності. Розглянуто сучасний стан ринку малих вітрогенераторів, їх конструктивні особливості та основні компоненти.

Проведене дослідження охоплює наступні ключові аспекти:

1. Фундаментальні принципи перетворення енергії вітру та особливості експлуатації вітроустановок в складі мікромереж.
2. Аналіз силових електронних перетворювачів, що застосовуються у вітроенергетичних системах.
3. Порівняльна характеристика методів забезпечення стабільності напруги та контролю енергетичних потоків.
4. Систематизація підходів до керування потужністю вітрових турбін.
5. Дослідження алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT).

Особлива увага приділена питанням оптимізації роботи вітроенергетичних установок в умовах змінних вітрових навантажень та забезпечення стабільного електропостачання споживачів у автономному режимі. Розглянуто сучасні методи підвищення енергоефективності та надійності таких систем через впровадження передових алгоритмів керування та оптимізації режимів роботи силових перетворювачів.

Результати дослідження створюють теоретичну базу для подальшого вдосконалення систем керування автономними мікромережами постійного струму з вітроенергетичними установками.

1.2 Аналіз роботи мереж з ВЕУ в ізолюваному режимі

Сучасні мікромережі являють собою комплексні енергетичні системи, побудовані на базі низьковольтного обладнання для розподілу електроенергії. До їх складу входять різноманітні джерела розподіленої генерації (наприклад, сонячні панелі, вітрогенератори, мікротурбіни) та системи акумулювання енергії (такі як літій-іонні батареї чи маховики).

Особливістю цих локальних енергетичних структур є їх гнучкість у режимах функціонування - вони можуть синхронно взаємодіяти з централізованою електромережею, отримуючи чи віддаючи енергію, або ж

повністю автономно забезпечувати потреби споживачів у разі відключення від загальної мережі. Цей режим, відомий як "острівний" або "off-grid", дозволяє підтримувати безперервне електропостачання навіть при аваріях у зовнішній мережі.

Сучасні мікромережі також оснащуються інтелектуальними системами керування, які оптимізують розподіл енергетичних потоків, забезпечують стабільність напруги та частоти, а також можуть прогнозувати споживання та генерацію енергії. Це робить їх важливим елементом концепції Smart Grid та підвищує загальну енергоефективність локальних систем електропостачання.

При функціонуванні у відокремленому режимі, мікромережа має забезпечувати достатній рівень генерації електроенергії для підтримки критично важливих споживачів. Другорядні навантаження можуть тимчасово відключатися, оскільки їх електропостачання зазвичай розраховане на живлення від центральної електромережі.

Після відновлення зв'язку з основною мережею відбувається автоматична реконфігурація системи - некритичні споживачі відновлюють своє електроживлення, а мікромережа переходить у синхронний режим роботи з централізованою енергосистемою.

Потужність та кількість установок розподіленої генерації у складі мікромережі визначається комплексом факторів:

- сумарною потужністю критичних споживачів;
- необхідним обсягом резервування енергії;
- графіком електричних навантажень;
- доступністю відновлюваних джерел енергії в регіоні;
- вимогами до надійності електропостачання;
- економічною доцільністю встановлення додаткових генеруючих потужностей.

Важливу роль також відіграє правильний підбір систем накопичення енергії, які забезпечують балансування генерації та споживання в автономному режимі роботи. Це можуть бути акумуляторні батареї,

суперконденсатори або інші технології, здатні швидко реагувати на зміни навантаження.

При роботі мікромережі в автономному режимі може виникати ситуація надлишкової генерації електроенергії. У таких випадках система керування може тимчасово деактивувати частину генеруючих установок, дозволяючи працювати лише тій кількості джерел, яка необхідна для покриття поточного споживання. Це оптимізує використання ресурсів та подовжує термін служби обладнання.

Що стосується побутового електроспоживання, значна частина сучасних пристроїв та електроніки функціонує на постійному струмі. Для їх живлення використовується один із двох основних підходів:

- безпосереднє підключення до джерел постійного струму (акумулятори, сонячні панелі);
- перетворення змінного струму з мережі у постійний за допомогою випрямних пристроїв.

Цікаво відзначити, що тенденція до збільшення кількості пристроїв з живленням від постійного струму призводить до розвитку концепції DC-мікромереж - локальних систем електропостачання, що працюють виключно на постійному струмі. Такі мережі мають вищий ККД через відсутність багаторазових перетворень енергії та краще підходять для інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення.

Крім того, використання постійного струму дозволяє спростити схеми захисту та керування, оскільки відсутня необхідність у синхронізації джерел за частотою та фазою.

У сучасних системах електропостачання все частіше застосовують архітектуру з магістральною шиною постійного струму, що дозволяє оптимізувати процеси передачі та перетворення енергії. Така конфігурація об'єднує різнотипні джерела та споживачі через спільну DC-шину, мінімізуючи кількість проміжних перетворень електроенергії (рис. 1.3).

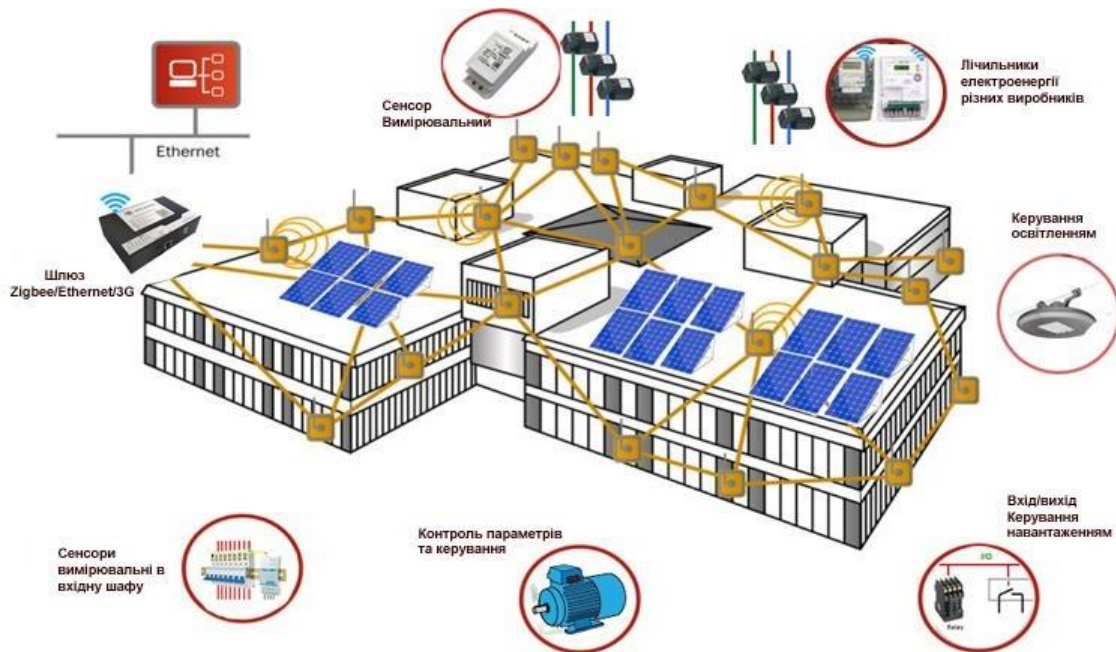


Рис. 1.3. Структурна схема мікромережі постійного струму

Основними компонентами такої системи є:

- вітрогенератори, що виробляють змінний струм та підключаються до DC-шини через AC/DC перетворювачі;
- фотоелектричні панелі, які генерують постійний струм та приєднуються через DC/DC конвертери для узгодження рівнів напруги;
- акумуляторні батареї та інші накопичувачі енергії, що працюють на постійному струмі та також використовують DC/DC перетворювачі;
- навантаження постійного струму, які живляться безпосередньо від DC-шини;
- споживачі змінного струму, що підключаються через інвертори (DC/AC перетворювачі).

Така топологія має ряд переваг:

- зменшення сумарних втрат енергії завдяки скороченню кількості етапів перетворення;
- спрощення процесів синхронізації джерел живлення;
- підвищення надійності електропостачання;
- краща сумісність з сучасними електронними пристроями.

1.3 Аналітичний огляд малих вітрових турбін

Компактні вітрогенератори малої потужності являють собою особливий клас енергетичних установок, що продукують електроенергію в діапазоні від одного до ста кіловат. Такі автономні системи зазвичай працюють як самостійні енергетичні одиниці. Їх конструкція передбачає пряме з'єднання з споживачами електроенергії або інтеграцію з системами накопичення енергії, найчастіше акумуляторними батареями різних типів.

Сучасний ринок відновлюваної енергетики демонструє стрімку динаміку розвитку, особливо у сфері сонячної генерації. Великі промислові підприємства все частіше інвестують у створення власних енергогенеруючих потужностей, вбачаючи в цьому значний економічний потенціал. Така тенденція пояснюється кількома факторами: зростанням тарифів на електроенергію, здешевленням технологій відновлюваної енергетики, державною підтримкою "зеленої" енергетики та прагненням компаній до енергетичної незалежності.

Малі вітрові турбіни часто комбінуються з сонячними панелями, утворюючи гібридні системи енергозабезпечення, що підвищує надійність та ефективність енергопостачання. Такі установки особливо актуальні для віддалених районів, фермерських господарств та приватних домоволодінь, де підключення до централізованої електромережі може бути економічно недоцільним або технічно складним.

У віддалених місцевостях все більшого поширення набувають інтегровані енергетичні системи, які поєднують фотоелектричні установки з локальними розподільчими мережами. Такі мікромережі можуть функціонувати як на постійному, так і на змінному струмі, забезпечуючи електропостачання різноманітних споживачів – від приватних будинків до комерційних об'єктів та освітніх закладів.

Впровадження мікромереж визнається експертами як економічно доцільний спосіб розширення використання відновлюваних джерел енергії

малої потужності. Цей підхід дозволяє оптимізувати капітальні витрати та експлуатаційні видатки, одночасно підвищуючи надійність енергопостачання.

Що стосується конструктивних особливостей малих вітрових турбін, то їх проектування базується на тих самих фундаментальних принципах аеродинаміки та механіки, які застосовуються при розробці потужних промислових вітрогенераторів. Однак малі установки мають свої специфічні вимоги та особливості, пов'язані з необхідністю забезпечення ефективної роботи при низьких швидкостях вітру, простотою монтажу та обслуговування, а також підвищеною стійкістю до турбулентності повітряних потоків у приземному шарі атмосфери.

Сучасні мікромережі також часто доповнюються системами накопичення енергії, інтелектуальними контролерами та засобами моніторингу, що дозволяє оптимізувати розподіл енергії між споживачами та забезпечити стабільність електропостачання навіть при змінних погодних умовах.

Сучасний ринок вітроенергетичних установок представлений двома основними конструктивними рішеннями: турбінами з горизонтальним розташуванням осі обертання та установками з вертикальною віссю. При цьому найбільше розповсюдження в промисловості та приватному секторі отримали саме горизонтально-осьові конструкції.

Типова ГВГУ має характерну трикомпонентну структуру: опорну вежу, гондолу з технологічним обладнанням та роторну систему з лопатями. У гондолі розміщується основне енергетичне обладнання – мультиплікатор (редуктор) та електрогенератор. Важливою конструктивною особливістю малих горизонтальних вітрогенераторів є розташування силової електроніки та систем керування біля підніжжя башти, що спрощує обслуговування та знижує навантаження на конструкцію.

До переваг горизонтально-осьових установок можна віднести:

- високий коефіцієнт використання енергії вітру;
- можливість саморегулювання при сильних поривах вітру;

- відносна простота конструкції та обслуговування;
- менша матеріаломісткість порівняно з вертикально-осьовими установками аналогічної потужності.

Вертикально-осьові вітрогенератори, хоча й мають меншу популярність, знаходять своє застосування в специфічних умовах, наприклад, у міській забудові, де присутня підвищена турбулентність повітряних потоків, або в регіонах з частою зміною напрямку вітру.

Конструкція вітроустановок з вертикальною віссю обертання відрізняється наявністю центральної башти, системи рухомих лопатей та роторного блоку, де розміщені генераторна установка та редукторний механізм. У сегменті ВВГУ виділяють два основні конструктивні рішення: класичний ротор Дар'є та його модифікована версія – ротор Н-Darrieus.

При порівняльному аналізі обох типів вітрогенераторів очевидну перевагу демонструють горизонтально-осьові установки, які забезпечують вищий коефіцієнт перетворення кінетичної енергії вітру в електричну. Додатковими перевагами ГВГУ є їхня здатність до автономного запуску та можливість ефективніше використовувати енергію повітряних потоків на значній висоті завдяки високій башті.

Проте вертикально-осьові установки мають свої унікальні переваги:

- незалежність роботи від напрямку вітру;
- нижчий рівень шумового забруднення;
- простіше технічне обслуговування через розташування генератора на рівні землі;
- краща стійкість до турбулентних потоків;
- менша небезпека для птахів та кажанів.

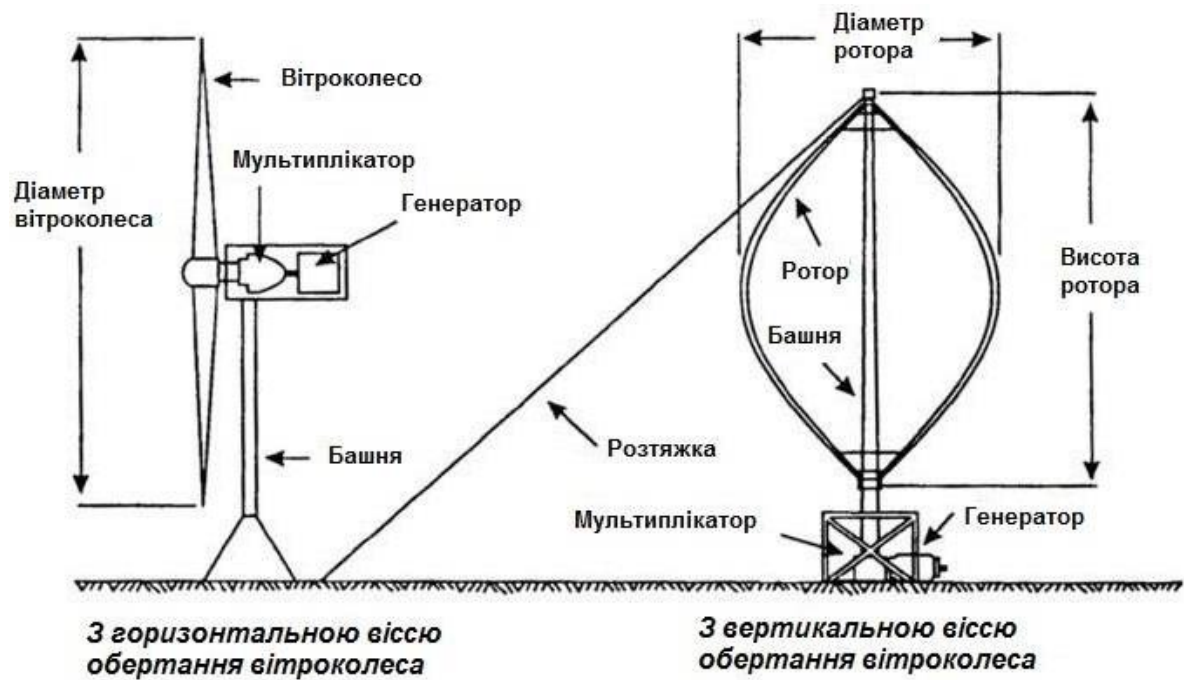


Рис. 1.4. Конструкція ГВГУ та ВВГУ



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд вітротурбін ВВГУ

Важливо відзначити, що вибір типу вітрогенератора значною мірою залежить від конкретних умов експлуатації, включаючи вітровий режим місцевості, наявність перешкод, вимоги до шумового забруднення та економічні фактори.

Сучасні вітроенергетичні установки проектується з двома принципово різними підходами до регулювання частоти обертання ротора: з постійною швидкістю та зі змінною. Ключова відмінність між цими конструктивними рішеннями полягає в методах оптимізації аеродинамічної ефективності при різних швидкостях вітрового потоку.

Хоча фундаментальний принцип трансформації кінетичної енергії вітру

в електричну є відносно нескладним, досягнення максимальної ефективності потребує комплексного підходу до проектування та експлуатації. Без впровадження сучасних систем керування та оптимізації може відбуватися суттєва втрата потенційної енергії вітрового потоку.

Системи зі змінною швидкістю обертання мають такі переваги:

- можливість оптимізації швидкості обертання відповідно до поточної швидкості вітру;
- зниження механічних навантажень на конструкцію;
- вища середньорічна продуктивність;
- краща якість виробленої електроенергії;
- зменшення шумового впливу.

Установки з фіксованою швидкістю, хоча й простіші конструктивно та дешевші, мають оптимальну ефективність лише при певній швидкості вітру. Проте для регіонів зі стабільним вітровим режимом такі системи можуть бути економічно виправданим рішенням.

Сучасні технології дозволяють впроваджувати інтелектуальні системи керування, які враховують не лише поточну швидкість вітру, але й прогнозовані зміни погодних умов, що додатково підвищує ефективність вітроенергетичних установок.

1.4 Аналіз конструкції малих вітрових турбін

Малі вітрогенератори складаються з декількох ключових елементів: обертового ротора, аеродинамічних лопатей, стабілізуючої хвостової секції та опорної вежі. Конструкція сучасної вітроустановки містить систему лопатей, з'єднаних із втулкою ротора, яка через головний вал передає обертальний момент на редуктор. Після редуктора крутний момент передається на вал електрогенератора. Така інженерна система ефективно вловлює кінетичну енергію повітряних мас і трансформує її в електричну потужність.

Для підвищення ефективності сучасні вітрові турбіни також

оснащуються:

- системою орієнтації за напрямком вітру;
- контролером заряду для регулювання вихідної потужності;
- інверторами для перетворення постійного струму в змінний;
- акумуляторними батареями для накопичення енергії;
- системою захисту від ураганного вітру.

Коефіцієнт корисної дії таких установок зазвичай становить 20-45%, залежно від конструкції та умов експлуатації. Малі вітрогенератори найкраще підходять для автономного енергозабезпечення віддалених об'єктів, фермерських господарств та приватних будинків, де середньорічна швидкість вітру перевищує 4-5 м/с.

Головними елементами вітрогенератора, що вловлюють потік повітря, є аеродинамічні лопаті. Роторний механізм зазвичай комплектується двома чи трьома симетрично розташованими крилами, які виготовляються з різних матеріалів - від традиційної деревини до сучасних композитів (склопластику) або високоміцної сталі. Ці лопаті обертаються довкола визначеної осі, яка може бути розміщена як горизонтально, так і вертикально. Швидкість їхнього обертання визначається двома ключовими факторами: інтенсивністю повітряного потоку та специфікою конструкції самих лопатей. Усі крила кріпляться до центральної втулки, яка, своєю чергою, надійно фіксується на опорній конструкції.

Варто додати, що сучасні технології дозволяють оптимізувати форму лопатей для максимальної ефективності:

- профіль лопаті розраховується з урахуванням аеродинамічних властивостей;
- використовуються спеціальні покриття для захисту від атмосферних впливів;
- застосовуються інноваційні композитні матеріали, що поєднують легкість і міцність;
- впроваджуються системи динамічного регулювання кута атаки

лопатеї.

Ефективність роботи вітротурбіни значною мірою залежить від правильного підбору матеріалів та геометрії лопатей відповідно до конкретних вітрових умов місцевості встановлення.

Аеродинамічні властивості лопатей вітрогенераторів базуються на двох фундаментальних принципах: використанні сили лобового опору або підйомної сили. При роботі за принципом лобового опору рух лопатей забезпечується прямим тиском повітряного потоку. Такі турбіни характеризуються відносно повільним обертанням, проте генерують значний крутний момент. Завдяки цим особливостям вони ефективно застосовуються для механічних операцій, таких як водяне помпування, подрібнення матеріалів чи абразивна обробка поверхонь.

Важливо зазначити додаткові характеристики таких систем:

- вони мають просту та надійну конструкцію;
- демонструють стабільну роботу при змінних вітрових навантаженнях;
- потребують мінімального технічного обслуговування;
- особливо ефективні для промислових механічних процесів.

На відміну від турбін, що працюють на принципі лобового опору, системи з використанням підйомної сили зазвичай мають вищу швидкість обертання та менший крутний момент, що робить їх більш придатними для генерації електроенергії. Ефективність перетворення енергії вітру в механічну роботу у турбін з лобовим опором становить близько 12-15%, тоді як системи, що використовують підйомну силу, можуть досягати ефективності 45-50%.

Важливим параметром ефективності вітроустановки є відношення лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості набігаючого потоку вітру. У вітрогенераторах з високим коефіцієнтом швидкохідності спостерігається інтенсивніше обертання ротора при однаковій силі вітру. Зважаючи на те, що сучасні електрогенератори потребують значних обертальних швидкостей для ефективної роботи, конструкції вітротурбін, які використовують принцип підйомної сили, виявляються найбільш доцільними для виробництва

електроенергії.

Додаткові технічні характеристики цього параметру:

- оптимальне співвідношення швидкостей для більшості сучасних турбін становить 6-8;
- при збільшенні довжини лопатей необхідно зменшувати частоту обертання для збереження допустимої швидкості кінців;
- надмірна швидкість може призвести до підвищеного зносу підшипників та вібрацій;
- аеродинамічний шум зростає пропорційно п'ятій степені швидкості кінців лопатей.

Для оптимізації роботи вітрогенератора важливо правильно розрахувати геометрію лопатей та їх кут атаки, щоб досягти найкращого балансу між швидкістю обертання та ефективністю перетворення енергії вітру. Сучасні системи керування дозволяють динамічно регулювати ці параметри залежно від поточних умов експлуатації.

Ефективність вітроустановки значною мірою визначається оптимальним співвідношенням кількості лопатей та площі, яку вони охоплюють при обертанні. Для максимального використання підйомної сили критично важливо забезпечити безперешкодне обтікання лопатей повітряним потоком. Конструкція передбачає достатні проміжки між елементами ротора, що запобігає виникненню турбулентних завихрень та негативному аеродинамічному впливу однієї лопаті на іншу. Саме тому найпоширенішими є дво- та трилопатеві конструкції вітрогенераторів.

Важливо відзначити фактори, що впливають на вибір кількості лопатей:

- трилопатева конструкція забезпечує найкращий баланс між ефективністю та стабільністю роботи;
- дволопатеві системи мають меншу вартість, але створюють більше вібрацій;
- однолопатеві конструкції з противагою рідко використовуються через нестабільність;

- багатолопатеві системи (4 і більше) застосовуються переважно у малопотужних установках для водопідйому.

У сучасному вітроенергетичному обладнанні великої потужності (понад 100 кВт) найчастіше використовується трилопатева схема, яка забезпечує оптимальне співвідношення між аеродинамічною ефективністю, механічною надійністю та економічною доцільністю. При цьому коефіцієнт використання енергії вітру може досягати 0,42-0,47.

Ключовим компонентом вітроустановки є електрогенератор, що здійснює перетворення механічної енергії обертання в електричну. Сучасний ринок пропонує широкий спектр генераторів, які можуть продукувати як змінний, так і постійний струм з різними показниками номінальної потужності. Габарити та потужність генератора безпосередньо корелюють з розмахом лопатей вітроколеса. Особливістю генераторів змінного струму є наявність систем стабілізації, які забезпечують сталість частоти та напруги навіть при змінній швидкості обертання ротора.

Технічні особливості сучасних вітроелектрогенераторів включають:

- використання постійних магнітів з рідкоземельних матеріалів для підвищення ефективності
- інтегровані системи охолодження для тривалої безперервної роботи;
- електронні системи керування для оптимізації режимів роботи;
- захист від перевантаження та короткого замикання.

В залежності від призначення використовуються різні типи генераторів:

- синхронні генератори з постійними магнітами - для автономних систем;
- асинхронні генератори - для роботи паралельно з мережею;
- генератори постійного струму – для систем з акумуляторними батареями.

Сучасні вітрогенератори можуть досягати ККД до 95% при перетворенні механічної енергії в електричну, що робить їх одним з найефективніших джерел відновлюваної енергії.

Вежі вітрогенераторів виконують подвійну функцію: слугують надійною опорною конструкцією та забезпечують оптимальне розташування турбіни на необхідній висоті. Таке підняття гарантує безпечний проміжок між лопатями та поверхнею землі, а також дозволяє використовувати потужніші та стабільніші повітряні потоки, які спостерігаються на більшій висоті. При визначенні оптимальної висоти вежі враховуються місцеві умови та нормативні обмеження.

Сучасні конструкції веж мають такі особливості:

- використання різних типів матеріалів: сталь, залізобетон або гібридні конструкції;
- наявність внутрішніх систем доступу для обслуговування;
- інтегровані системи блискавкозахисту;
- спеціальні демпфуючі елементи для гасіння вібрацій.

Важливо зазначити, що висота вежі суттєво впливає на продуктивність вітроустановки, оскільки швидкість вітру зростає логарифмічно з висотою над поверхнею землі. На висоті 100 метрів швидкість вітру може бути на 30-40% вищою порівняно з приземним шаром, що відповідно збільшує генерацію енергії. При проектуванні також враховуються сейсмічна активність регіону, максимальні вітрові навантаження та вимоги до транспортування компонентів вежі.

У сучасних вітроенергетичних системах силова електроніка відіграє ключову роль у перетворенні та стабілізації електроенергії. Основними типами перетворювачів є випрямлячі (AC/DC), інвертори (DC/AC) та конвертери (DC/DC). Первинна електрична енергія, що генерується турбіною, спершу перетворюється у постійний струм через випрямляч. Далі, залежно від потреб споживача, вона може безпосередньо живити пристрої постійного струму або трансформуватися інвертором у змінний струм для подачі в електромережу чи живлення побутових приладів.

Сучасні силові перетворювачі мають такі технічні особливості:

- використання IGBT-транзисторів для підвищення ефективності;

- мікропроцесорне керування для оптимізації режимів роботи;
- захист від перенапруг та короткого замикання;
- синхронізація з мережею для паралельної роботи.

Ефективність перетворення енергії у сучасних системах досягає 97-98%.

При цьому застосовуються різні схеми стабілізації:

- ШІМ-регулювання для контролю напруги та частоти;
- системи відстеження точки максимальної потужності (MPPT);
- активна фільтрація гармонік;
- компенсація реактивної потужності.

Це дозволяє забезпечити високу якість електроенергії та надійне електропостачання споживачів незалежно від змін швидкості вітру та навантаження.

Пристрої для конвертації змінного струму в постійний називають випрямними системами або випрямлячами. У вітроенергетичних установках найпоширенішим рішенням є трифазна мостова схема випрямлення, що зображена на рис. 1.6. Ця конфігурація забезпечує повнохвильове випрямлення з характерними шістьма пульсаціями за період у вихідному сигналі постійної напруги.

Варто додати, що сучасні випрямлячі часто використовують силові напівпровідникові елементи – діоди або тиристори. Трифазна мостова схема (схема Ларіонова) складається з шести таких елементів, з'єднаних особливим чином. Перевагами цієї топології є:

- висока ефективність перетворення енергії (ККД може досягати 98-99%);
- відносно низький рівень пульсацій вихідної напруги;
- можливість роботи з високими потужностями.

Для додаткового згладжування пульсацій випрямленої напруги зазвичай використовують фільтруючі конденсатори та дроселі, що підключаються на виході випрямляча.

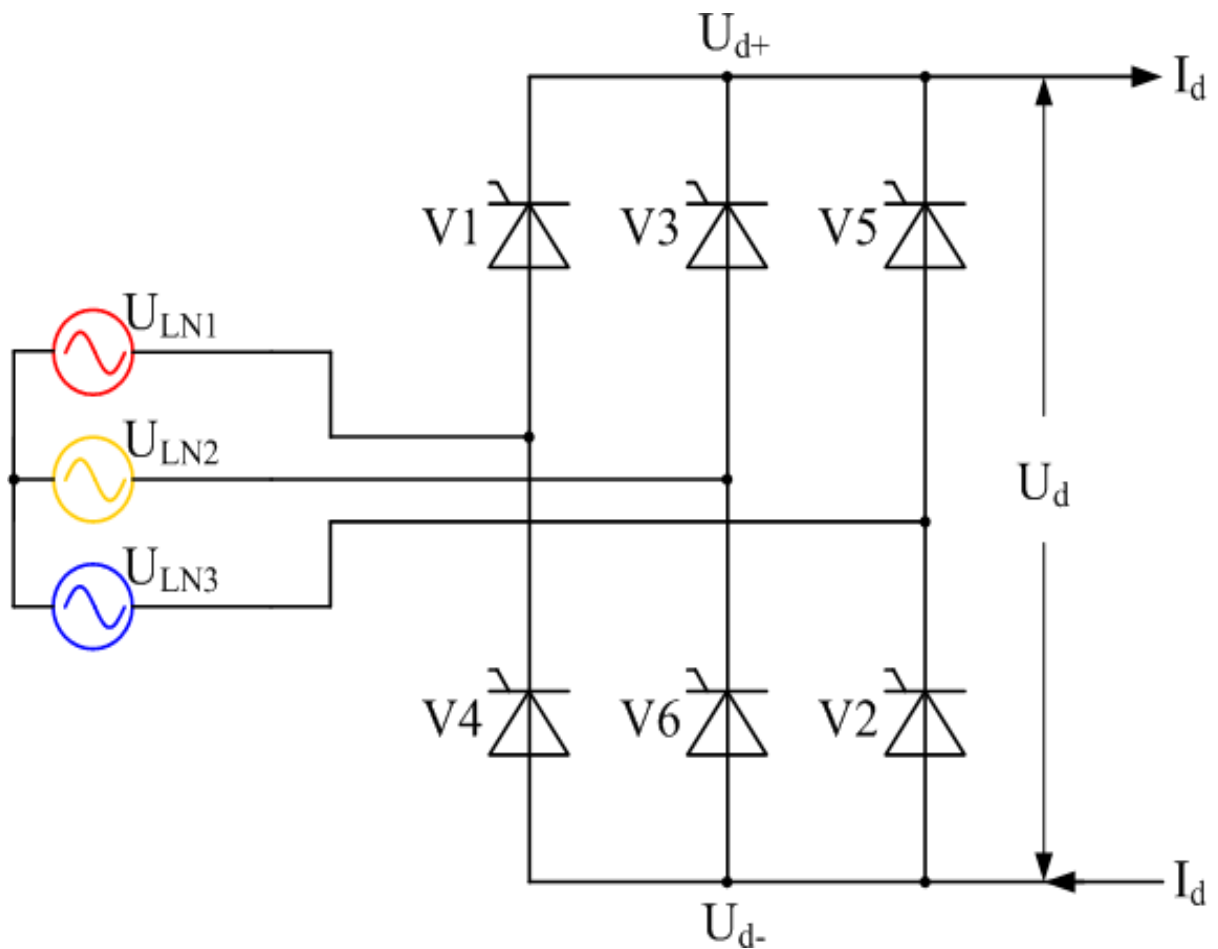


Рис. 1.6. Схема 3-фазного мостового випрямляча

Пристрої перетворення постійної напруги являють собою електронні системи, які трансформують вхідну постійну напругу одного рівня у вихідну постійну напругу іншого значення. Такі конвертори не лише змінюють рівень напруги, але й забезпечують фільтрацію електричних завад та ефективне керування системою живлення.

В сучасній електроніці використовують три основні топології таких перетворювачів:

- Buck-конвертор (понижувальний) – зменшує вихідну напругу відносно вхідної;
- Boost-конвертор (підвищувальний) – збільшує вихідну напругу порівняно з вхідною;
- Buck-boost конвертор (комбінований) – може як підвищувати, так і знижувати напругу;

Ключовими компонентами цих пристроїв є:

- індуктивність (дросьель) – накопичує енергію в магнітному полі;
- конденсатор – згладжує пульсації вихідної напруги;
- діод – забезпечує однонаправлений потік струму;
- силовий ключ (IGBT або MOSFET транзистор) – керує процесом

перетворення.

Важливо додати, що сучасні DC-DC перетворювачі можуть досягати ефективності понад 95% завдяки використанню новітніх напівпровідникових технологій та вдосконалених схем керування.

Висновки до розділу

1. У процесі аналізу було досліджено функціонування мікромереж на постійному струмі, що працюють відокремлено від загальної електромережі. Особлива увага приділялася вивченню малопотужних вітрогенераторів – їхній конструкції, складових елементів та актуальним тенденціям розвитку ринку цього обладнання.

2. Детально проаналізовано фізичні основи та технологічні аспекти перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію. Проведено порівняльний аналіз різних підходів до забезпечення стабільності напруги та керування енергетичними потоками в таких системах. Окремо розглянуто силові електронні перетворювачі, що застосовуються у вітроенергетичних установках, їхні особливості та характеристики.

3. В ході дослідження проаналізовано різноманітні стратегії керування потужністю вітроенергетичних установок. Особливу увагу приділено алгоритмам пошуку та утримання точки максимальної потужності (MPPT - Maximum Power Point Tracking), які забезпечують оптимальний режим роботи вітрогенератора при змінних швидкостях вітру.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ПОБУТОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Дослідження процесу генерації електричної енергії в мікромережі ВЕУ

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) містять декілька ключових елементів. Головним компонентом виступає ротор, оснащений лопатями, кількість яких може варіюватися (зазвичай від 2 до 3 для великих установок та до 6-8 для малих). Цей механізм відповідає за уловлювання кінетичної енергії повітряних мас та її трансформацію у обертальний рух. Далі механічна енергія передається до електрогенератора, який перетворює її в електричну.

Невід'ємною частиною конструкції є комплекс керування та захисних механізмів, що забезпечують безпечну та ефективну роботу установки при різних погодних умовах. Важливу роль відіграє силова електроніка - набір пристроїв, що опрацьовують вироблену електроенергію. Залежно від призначення, енергія може накопичуватися в акумуляторах, надходити до загальної електромережі або використовуватися для живлення конкретних пристроїв, таких як водяні помпи, системи опалення чи освітлення.

Сучасні ВЕУ також оснащуються додатковими системами: анемометрами для вимірювання швидкості та напрямку вітру, механізмами повороту гондоли для оптимального розташування відносно вітру, системами аварійного гальмування при надмірних швидкостях вітру та засобами віддаленого моніторингу роботи установки.

У конструкції малих вітроенергетичних установок ключову роль відіграє електричний генератор, який здійснює перетворення кінетичної енергії обертання в електричну. Особливу увагу розробників та дослідників привертають синхронні генератори з постійними магнітами, що

характеризуються підвищеною кількістю полюсів. Їхня головна перевага полягає у можливості безпосереднього з'єднання з валом вітроколеса, що усуває потребу в редукторі чи іншій системі трансмісії.

Такі безредукторні конструкції мають низку суттєвих переваг: зменшення загальної маси установки, підвищення надійності через відсутність механічних передач, скорочення витрат на обслуговування та зниження механічних втрат енергії. Багатополіусне виконання ротора дозволяє генератору ефективно працювати при відносно низьких обертах, що характерно для малих вітротурбін.

Сучасні постійні магніти, виготовлені з рідкоземельних матеріалів (наприклад, неодим-залізо-бор), забезпечують високу щільність магнітного потоку, що дозволяє досягати значної питомої потужності генератора при компактних розмірах. Додатковими перевагами таких генераторів є відсутність потреби у зовнішньому збудженні та висока ефективність перетворення енергії в широкому діапазоні швидкостей вітру.

Особливістю синхронних генераторів із постійними магнітами є їхня здатність працювати без додаткових систем регулювання магнітного поля збудження. Амплітуда генерованої напруги має пряму залежність від швидкості обертання ротора, що дозволяє використовувати цей параметр як непрямий показник частоти обертання вітроколеса. Під час роботи системи керування вітроустановкою відстеження швидкості здійснюється через моніторинг величини вихідної напруги генератора.

Однак така особливість створює певні технічні виклики. Оскільки швидкість вітру постійно змінюється, це спричиняє флуктуації частоти обертання ротора генератора. Як наслідок, у ланці постійного струму виникають небажані коливання напруги, які без належної системи стабілізації можуть негативно впливати на роботу всієї енергетичної системи.

Для вирішення цієї проблеми застосовують різноманітні технічні рішення: силові перетворювачі з активним випрямленням, системи накопичення енергії (акумулятори, суперконденсатори), електронні

регулятори напруги та спеціалізовані алгоритми керування. Ці компоненти забезпечують стабільні параметри вихідної електроенергії незалежно від змінних умов експлуатації вітрогенератора. Додатково можуть встановлюватися системи захисту від перенапруги та автоматичного відключення при критичних режимах роботи.

Для забезпечення стабільної напруги в умовах змінної швидкості обертання генератора застосовують технічне рішення у вигляді підвищувального DC-DC перетворювача, який встановлюється в ланці постійного струму. Така конфігурація дозволяє ефективно працювати вітроустановці при різних швидкостях вітру, підтримуючи задані параметри вихідної напруги.

Важливою особливістю роботи синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) є однонаправленість потоку активної потужності - енергія передається виключно від генератора до ланки постійного струму через силовий перетворювач. Ця характеристика відкриває можливість оптимізації схеми за критерієм економічної ефективності. Зокрема, на стороні генератора доцільно використовувати некерований діодний випрямляч, який відрізняється простотою конструкції, надійністю та низькою вартістю порівняно з керованими випрямлячами.

Така комбінація діодного випрямляча та підвищувального перетворювача забезпечує оптимальне співвідношення ціни та функціональності системи. Підвищувальний перетворювач здійснює регулювання напруги та може бути інтегрований із системою відбору максимальної потужності (MPPT - Maximum Power Point Tracking), що дозволяє досягти найвищої ефективності перетворення енергії вітру при різних швидкостях повітряного потоку.

Стрімкий розвиток технологій відновлюваної енергетики сприяє зростанню популярності концепції мікромереж як перспективного рішення для локального енергозабезпечення. Такі енергетичні системи проєктуються з можливістю інтеграції різноманітних джерел екологічно чистої енергії та

систем акумулювання, що працюють під керуванням інтелектуальних систем моніторингу та управління.

Сучасна мікромережа може поєднувати сонячні панелі, вітрогенератори, малі гідроелектростанції, біогазові установки з різними типами накопичувачів енергії - акумуляторними батареями, суперконденсаторами, маховиками або системами на основі водню. Комплексне використання цих технологій дозволяє забезпечити безперебійне та якісне електропостачання споживачів навіть при нестабільній генерації від відновлюваних джерел.

Важливу роль у функціонуванні мікромереж відіграють системи керування на основі предиктивних алгоритмів та штучного інтелекту. Вони здійснюють постійний моніторинг параметрів мережі, прогнозування генерації та споживання, оптимізацію режимів роботи обладнання та балансування потоків енергії. Це дозволяє досягти максимальної енергоефективності, надійності електропостачання та мінімізації експлуатаційних витрат. Додатково такі системи можуть забезпечувати автономну роботу мікромережі при відключенні від централізованої енергосистеми.

2.2 Дослідження роботи автономної ВЕУ в мікромережах

Мікромережі постійного струму дедалі більше привертають увагу завдяки своїм перевагам порівняно з системами змінного струму. Вони мінімізують низку технічних складнощів, що характерні для традиційних електромереж. Однією з ключових переваг є ефективне об'єднання джерел електроенергії постійного струму, що сприяє зменшенню втрат енергії під час її передачі. До того ж такі мережі забезпечують стабільну і надійну роботу енергетичних систем, що робить їх перспективними для інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі чи акумуляторні системи зберігання.

Мікромережі постійного струму також сприяють підвищенню

енергоефективності, адже вони усувають потребу в перетворенні струму з одного типу на інший. Це особливо важливо для об'єктів, які активно використовують технології на базі постійного струму, наприклад, у транспорті, системах розподіленої генерації та навіть у побутових приладах, які все частіше працюють на постійному струмі.

У цьому дослідженні автономна мікромережа постійного струму включає кілька ключових компонентів: мікротурбіну (МВТ) з синхронним генератором постійних магнітів (СГПМ), перетворювач змінного струму в постійний (AC/DC), перетворювач постійного струму в постійний (DC/DC), а також акумуляторну батарею для зберігання енергії. Навантаження в такій мікромережі може бути представлено світлодіодним освітленням або іншими побутовими приладами, що використовуються в житлових приміщеннях.

Така конфігурація забезпечує стабільність електропостачання, мінімізує втрати енергії та є зручною для інтеграції з відновлюваними джерелами, такими як сонячні панелі. Крім того, застосування світлодіодного освітлення підвищує енергоефективність системи, оскільки такі джерела світла споживають значно менше енергії порівняно з традиційними лампами розжарювання або навіть люмінесцентними лампами.

Система також дозволяє гнучко адаптуватися до змін навантаження і забезпечувати надійне енергопостачання для сучасних побутових пристроїв, які часто потребують саме постійного струму для роботи.

На сьогоднішній день стандартне значення напруги для мікромереж постійного струму ще не визначено. Проте найчастіше використовуються рівні напруги 24 В або 48 В. Такий вибір пояснюється низкою факторів, зокрема забезпеченням високого рівня безпеки, оптимальною сумісністю з акумуляторними батареями, зручністю у виборі силових перетворювачів, а також підвищенням загальної надійності системи.

Мікромережі постійного струму стають ефективним рішенням для забезпечення високої якості електроенергії, оскільки вони здатні зменшувати втрати під час передачі енергії та уникати проблем, пов'язаних з гармоніками,

характерними для змінного струму. Крім того, використання таких мереж спрощує інтеграцію сучасних джерел енергії, таких як фотоелектричні панелі та системи зберігання енергії. Це сприяє створенню більш стійких і екологічних енергетичних систем.

Силові перетворювачі відіграють ключову роль у функціонуванні мікромереж, забезпечуючи інтеграцію різноманітних відновлюваних джерел енергії та передачу електроенергії між окремими компонентами системи. Основу таких перетворювачів складають напівпровідникові елементи, серед яких діоди, перемикачі, а також пасивні компоненти, такі як індуктивності, резистори та конденсатори. Їхня скоординована робота дозволяє оптимізувати перетворення енергії, знижуючи втрати та забезпечуючи стабільність енергопостачання [15].

Крім того, сучасні перетворювачі потужності активно вдосконалюються завдяки впровадженню нових матеріалів, таких як карбід кремнію (SiC) та нітрид галію (GaN), які підвищують ефективність і зменшують розміри пристроїв. Це дозволяє адаптувати їх до вимог мікромереж, забезпечуючи надійне і гнучке управління енергопотоками в умовах широкого використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова генерація.

На рисунку 2.1 зображено типову конфігурацію мікромережі постійного струму, що забезпечує електропостачання навантажень. Така топологія широко використовується в системах з мікротурбінами (МВТ), які живлять освітлювальні прилади, а також зарядні станції для електромобілів. Основним компонентом цієї системи є контролер максимального відбору потужності (MPPT), який регулює роботу силового перетворювача для забезпечення максимальної ефективності генерації енергії.

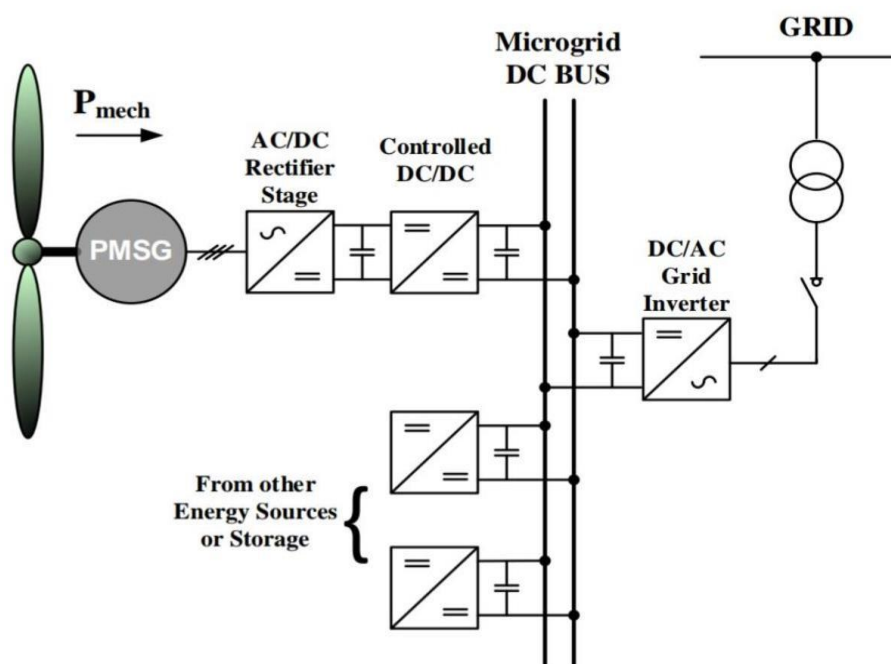


Рис. 2.1. Малі вітрові турбіни в мікромережі

Залежно від рівня напруги, що генерується МВТ, силовий перетворювач може працювати як у режимі підвищення, так і в режимі зниження напруги. Для стабільного функціонування системи часто додається накопичувач енергії, такий як акумуляторна батарея. Він підключається до шини постійного струму, виконуючи роль буфера: накопичує надлишкову енергію або живить навантаження в періоди, коли вихідна потужність МВТ знижується через варіації швидкості вітру.

Така структура мікромережі забезпечує стабільне постачання електроенергії для критичних споживачів, навіть у ситуаціях з нестабільним виробництвом енергії, що робить її надзвичайно ефективною для застосування в умовах інтеграції відновлюваних джерел.

Однією з головних проблем, пов'язаних зі стандартизацією напруги в мікромережах постійного струму, є різноманітність рівнів напруги, що використовуються для забезпечення розподіленої генерації та живлення побутових, комерційних і промислових навантажень. Така неоднорідність створює значні труднощі в розробці та стандартизації електроприладів і пристроїв, які безпосередньо підключаються до мікромереж постійного

струму. Відсутність єдиного стандарту обмежує взаємозамінність обладнання та ускладнює інтеграцію різних компонентів в єдину систему.

Впровадження стандартів напруги є важливим кроком для уніфікації пристроїв та створення взаємосумісних рішень у мікромережах постійного струму.

2.3 Технічні характеристики та вибір місця розміщення малої вітрової турбіни

При виборі місця для встановлення вітрової турбіни важливо враховувати вплив навколишніх об'єктів, таких як дерева, будівлі або інші споруди, оскільки вони можуть створювати турбулентність і вихори, які значно знижують ефективність турбіни. Для забезпечення максимальної продуктивності вітрогенератора необхідно ретельно підбирати локацію, дотримуючись правил мінімальної відстані від потенційних перешкод.

Критично важливо, щоб нижня частина ротора турбіни розташовувалася вище за найвищу перешкоду в зоні турбулентності. Рекомендована висота становить не менше 9 метрів над найвищим об'єктом, що знаходиться поблизу, як зображено на рисунку 2.2. Це дозволяє уникнути зон з нестабільним потоком повітря, покращує якість вітру, який надходить до турбіни, та забезпечує ефективне використання енергії вітру.

Дотримання цих рекомендацій не лише підвищує ефективність роботи вітрової турбіни, але й зменшує зношування її компонентів, сприяючи тривалому та надійному функціонуванню.

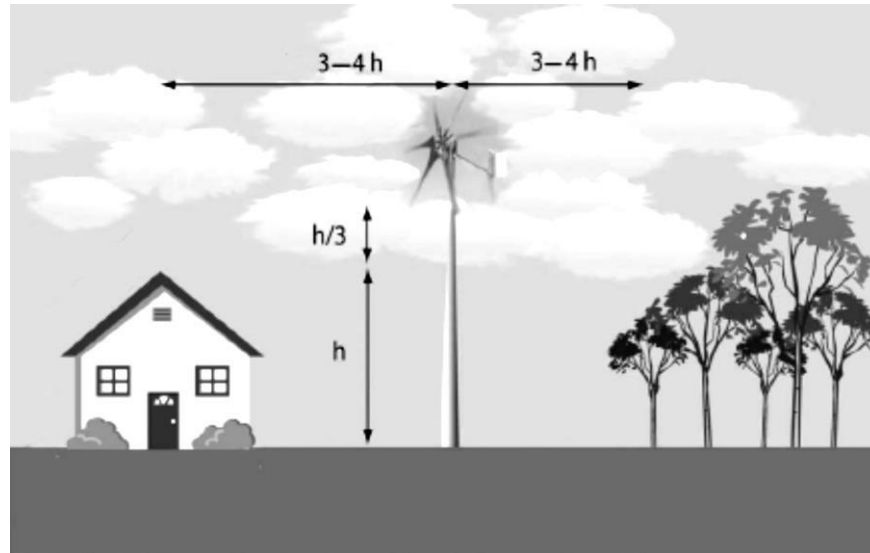


Рис. 2.2. Мінімальні відстані в залежності від висоти наявних перешкод

При проєктуванні вітроенергетичних установок (ВЕУ) важливо враховувати довжину електричних проводів, які з'єднують вітрову турбіну і навантаження. Це необхідно для мінімізації втрат енергії, які виникають через опір і нагрів проводів. Надмірна довжина проводів може значно знизити ефективність системи, тому вибір відповідного перерізу кабелю та оптимізація його довжини є важливими аспектами проєктування [16].

ВЕУ складається з кількох основних компонентів. Вітрова турбіна перетворює енергію вітру в механічну, передаючи обертальний рух через вал на систему передач. Система передач забезпечує передачу номінального крутного моменту на генератор. Генератор, у свою чергу, перетворює механічну енергію в електричну, розвиваючи потужність, необхідну для живлення навантажень.

Типова схема мікровітроенергетичної установки (МВТ) ілюструється на рисунку 2.3. Така система може включати як акумуляторний блок для зберігання надлишкової енергії, так і перетворювач потужності для стабілізації вихідних параметрів енергії, що подається до навантажень. Оптимізація всіх компонентів дозволяє створити ефективну і надійну систему для використання енергії вітру, навіть у умовах нестабільного потоку повітря.

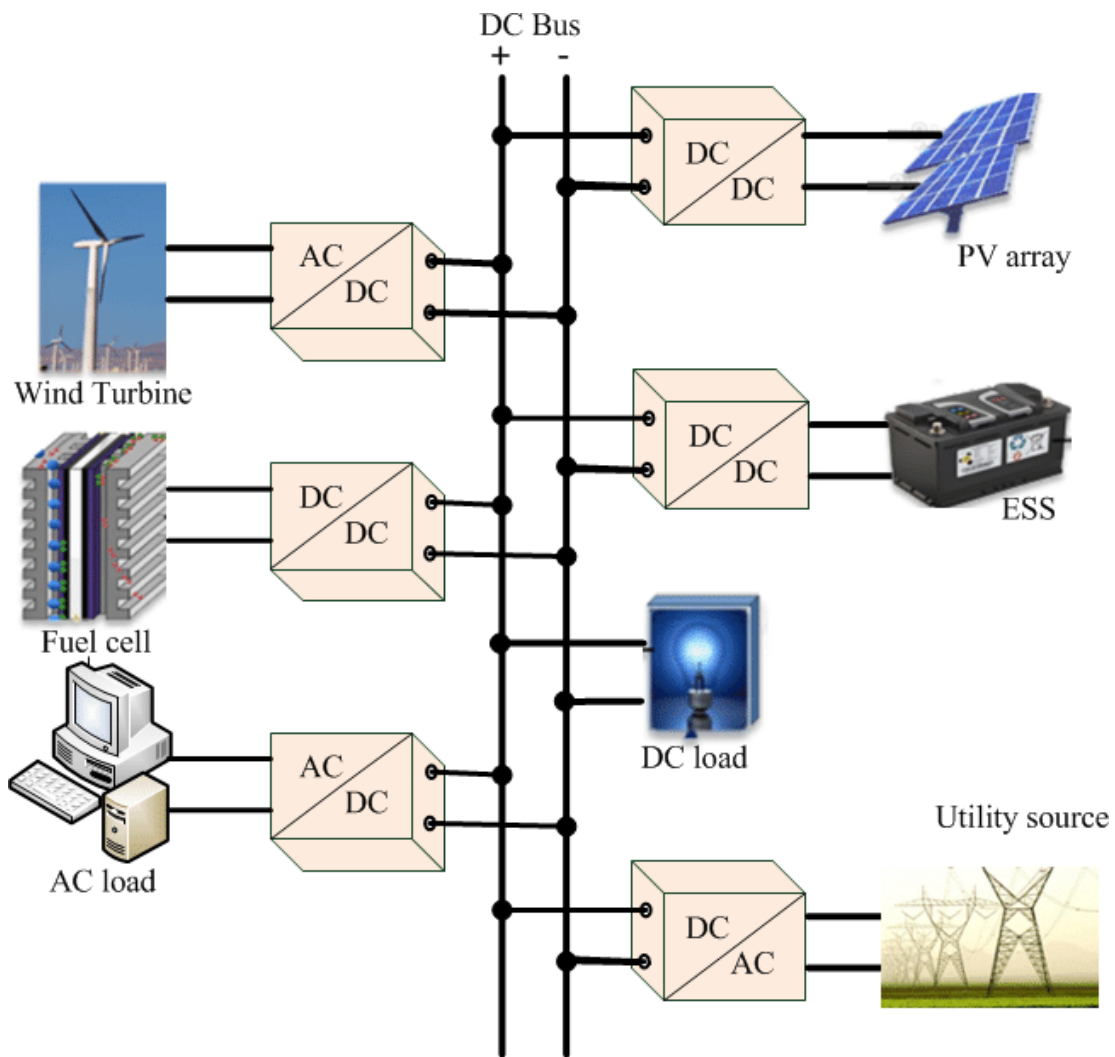


Рис. 2.3. Структурна схема мікромережі постійного струму

Ротори горизонтальної осі мікровітроденергетичних установок (МВТ) монтуються перпендикулярно до осі вежі, а їх вісь розташована паралельно до поверхні землі. Як показано на рисунку 2.4, існують дві основні конфігурації ВЕУ: завітряна (upwind) і противітряна (downwind).

У завітряних ВЕУ ротор розташований з боку вхідного вітру перед вежею. Такий підхід дозволяє уникнути виникнення вітрової тіні, яка може знижувати ефективність роботи турбіни. Однак через те, що повітряний потік огинає вежу, перш ніж пройти до ротора, можуть виникати певні втрати потужності. Для забезпечення правильного орієнтування ротора відносно напрямку вітру використовується система рискання (yaw system), що дозволяє турбіні постійно спрямовуватись у напрямку вітру.

У противітряних ВЕУ ротор розташований ззаду відносно напрямку вітру, а гондола орієнтована за вітром. Головною перевагою такої конфігурації є відсутність необхідності в системі рискання, оскільки ротор автоматично орієнтується за потоком повітря. Крім того, лопаті ротора можуть бути гнучкими, оскільки немає ризику зіткнення з вежею. Це робить конструкцію більш стійкою до сильних поривів вітру та зменшує механічне навантаження на лопаті.

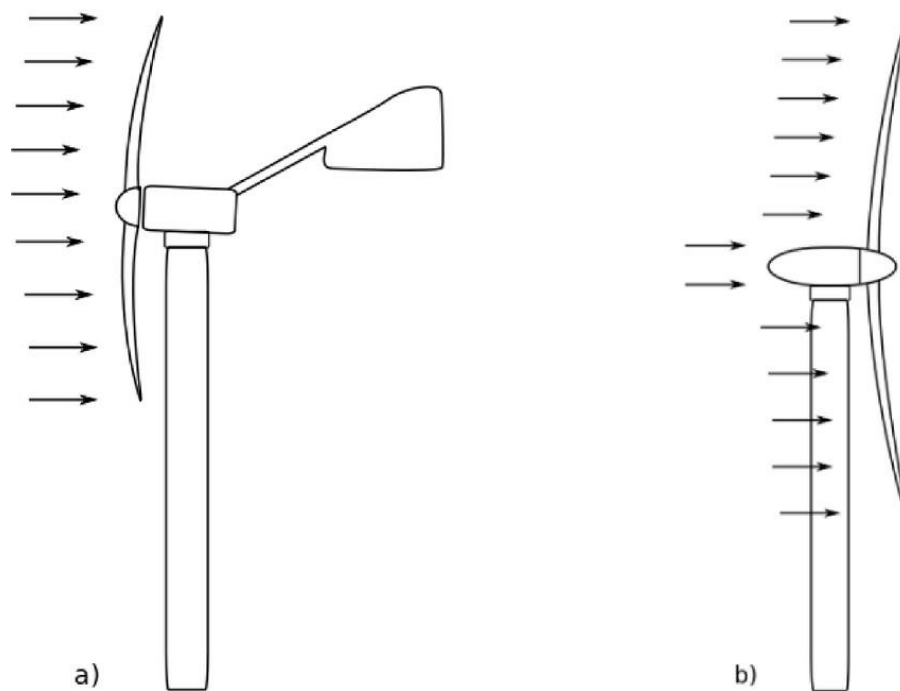


Рис. 2.4. Навітряні (а) та підвітряні (б) ВЕУ

Обидві конфігурації горизонтально-осьових вітроустановок мають свої сильні та слабкі сторони, і вибір між ними визначається такими факторами, як характеристики вітрового потоку, технічні вимоги, економічна доцільність та умови встановлення.

Переваги завітряної конфігурації МВТ:

- уникає ефекту вітрової тіні, що дозволяє досягти більшої ефективності у стабільних вітрових умовах;
- забезпечує вищу продуктивність завдяки безпосередньому впливу

вітру на ротор;

Недоліки завітряної конфігурації МВТ:

- потребує системи ризикання, що додає складності та вартості конструкції;

- турбулентність навколо вежі може призводити до невеликих втрат енергії;

Переваги противітряної конфігурації МВТ:

- відсутність потреби в системі ризикання спрощує конструкцію і знижує витрати на обслуговування;

- гнучкість лопатей мінімізує ризик пошкодження при сильних поривах вітру;

Недоліки противітряної конфігурації МВТ:

- можливість утворення вітрової тіні, що знижує ефективність роботи ротора;

- складність в управлінні аеродинамічними характеристиками через вплив турбулентності за вежею.

Рішення про використання тієї чи іншої конфігурації залежить від:

- швидкості вітру: завітряні турбіни краще підходять для ділянок зі стабільним потоком;

- просторових обмежень: противітряні установки можуть бути ефективними в умовах, де складно використовувати системи ризикання;

- економічних факторів: противітряні установки є дешевшими в обслуговуванні, але менш ефективними в несприятливих вітрових умовах.

Комплексна оцінка цих факторів дозволяє оптимізувати вибір конфігурації для максимального використання енергії вітру.

У малих вітрових турбінах величина запасеної кінетичної енергії визначається за виразом:

$$E = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (2.1)$$

Кількість повітря, що взаємодіє з ротором за одну секунду, відповідає поперечному перерізу самого ротора. При цьому товщина повітряного потоку визначається швидкістю вітру. Максимальна ефективність перетворення енергії у таких системах наближається до 60 %. Це означає, що лише частина кінетичної енергії, яку передає вітер, використовується для обертання ротора, тоді як решта залишається втраченою через технічні та фізичні обмеження. Така ефективність відома як межа Беца, і вона є теоретичним максимумом, що вказує на обмеження при перетворенні енергії вітру у механічну чи електричну.

Перетворена енергія безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом потужності, який математично залежить від ряду факторів, зокрема конструкції лопатей, характеристик ротора, а також точності налаштувань системи. Досягнення оптимального коефіцієнта потужності можливе лише за умови ретельного проєктування та правильного розташування всіх ключових елементів. Коефіцієнт потужності відображає ефективність вловлювання енергії вітру і є критичним параметром для максимізації роботи вітроенергетичної установки.

У малих вітрових турбінах кут тангажу зазвичай встановлюється на рівні нуля, що значно спрощує конструкцію. У таких умовах характеристика коефіцієнта потужності визначається тяговою силою, співвідношенням швидкості обертання наконечника лопатей до швидкості вітру та крутним моментом на лопатях ротора. Коефіцієнт крутного моменту, який представляє собою відношення фактично генерованого моменту до його теоретичного максимуму, є важливим показником ефективності. Водночас потужність, вироблена ротором, залежить від співвідношення швидкості обертання наконечника до швидкості вітрового потоку, що впливає на аеродинамічні характеристики системи та її загальну продуктивність.

Взаємодія між вітровим потоком і ротором безпосередньо впливає на його здатність ефективно видобувати енергію. Залежність коефіцієнта потужності від швидкості обертання наконечника забезпечує універсальну

характеристику продуктивності, яка не залежить ні від розмірів ротора, ні від географічних особливостей місця встановлення. Як показано на графіку (рис. 2.5), коефіцієнт потужності збільшується зі зростанням відношення швидкості обертання наконечника до швидкості вітру, що вказує на підвищення ефективності. Однак, при перевищенні оптимального значення цього співвідношення коефіцієнт потужності починає знижуватися. Таке падіння зазвичай пов'язане з втратами через підвищену турбулентність і зменшення аеродинамічної ефективності лопатей.

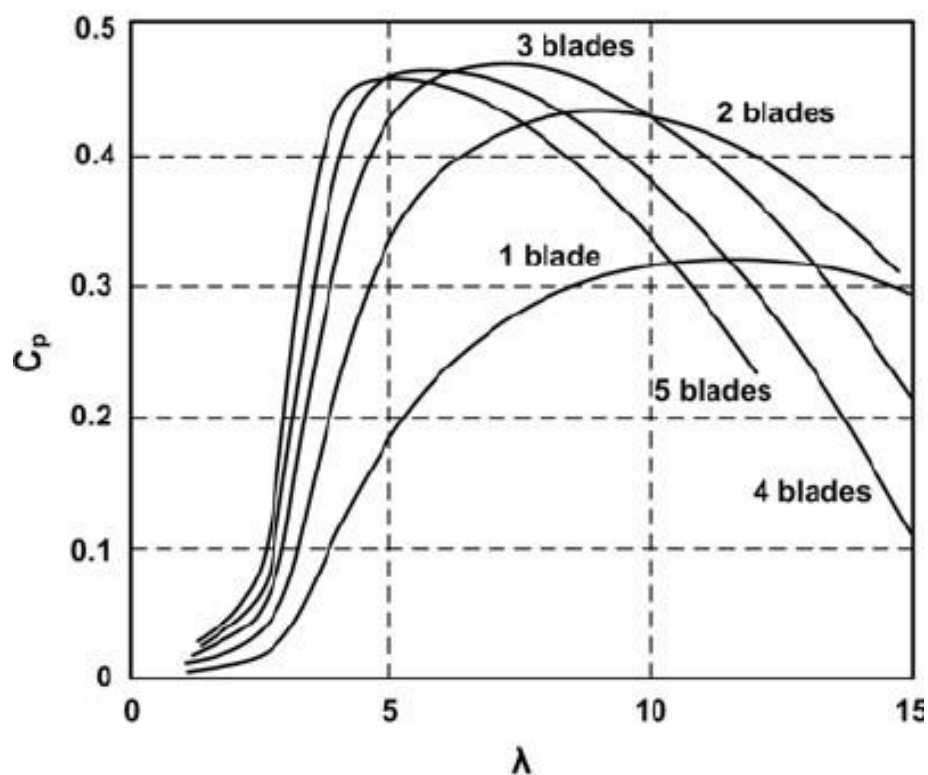


Рис. 2.5. Графіки залежності значень коефіцієнта потужності від величини частоти обертання наконечника МВТ

2.4 Малі вітрогенератори на основі СГПМ

У малих вітрових турбінах зі змінною швидкістю генератори підключаються до електромережі або індивідуальних навантажень за допомогою силових електронних блоків. Ці блоки виконують функції розв'язки та забезпечують керування системою, дозволяючи оптимізувати

роботу генератора залежно від умов. У таких системах зазвичай використовуються синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ).

СГПМ мають низку переваг, серед яких компактність, висока надійність, високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та відсутність потреби у зовнішньому джерелі збудження. На відміну від асинхронних генераторів, СГПМ не потребують зовнішніх обмоток для створення магнітного потоку в роторі. Потік у машині формується завдяки постійним магнітам, що робить ці генератори енергоефективними та простими в обслуговуванні. Це робить їх ідеальним вибором для малих вітроенергетичних систем, де важливими є компактність і надійність.

Синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ) мають значну перевагу завдяки своїй конструкції, яка не потребує громіздких обмоток ротора, характерних для синхронних генераторів із пораненим ротором. Це дозволяє створювати компактніші та легші генератори. Крім того, використання постійних магнітів у конструкції СГПМ забезпечує можливість інтеграції більшої кількості магнітних полюсів у машину, що суттєво розширює її функціональні можливості.

Збільшення кількості магнітних полюсів має ключову перевагу – такі багатополосні генератори можуть ефективно працювати на низьких швидкостях обертання. Завдяки цьому низькошвидкісні СГПМ особливо підходять для вітроенергетичних установок (ВЕУ), оскільки дозволяють усунути необхідність використання редуктора. У такій конфігурації низькошвидкісний вал турбіни може напряму приводити генератор у рух, що не лише знижує втрати енергії на механічні передачі, але й підвищує загальну надійність та довговічність системи.

Використання СГПМ без редуктора значно зменшує розміри та вартість вітротурбінної системи, одночасно підвищуючи її надійність завдяки меншій кількості механічних компонентів, схильних до зносу. Зменшення залежності від редуктора також сприяє зниженню рівня шуму та втрат енергії, що є важливим фактором для автономних і великих вітроенергетичних систем.

Останніми роками вартість матеріалів для постійних магнітів, таких як неодимові магніти, значно знизилася. Це зробило СГПМ не лише ефективним вибором для малих вітрових турбін, але й привабливим варіантом для великих установок потужністю в кілька мегават. Завдяки своїм перевагам, СГПМ стали популярними в сучасній вітроенергетиці, де ефективність і надійність є ключовими пріоритетами.

У рамках цього дослідження для оцінки ефективності алгоритму максимального відстеження потужності (MPPT) та запропонованої схеми керування було обрано вітроенергетичну систему на базі СГПМ. Такий вибір обумовлений перевагами цієї технології для автономних систем, де критично важливі стабільність і висока ефективність роботи.

Робота вітроенергетичних установок (ВЕУ) зі змінною швидкістю має низку переваг. Однією з них є зниження механічних навантажень на вали турбіни та зубчасті передачі, оскільки лопаті здатні поглинати пікові навантаження вітрового моменту під час коливань швидкості обертання. Це сприяє підвищенню довговічності системи та зменшенню витрат на її обслуговування.

Водночас робота зі змінною швидкістю має і недоліки. Для забезпечення функціонування вітротурбіни як стабільного джерела енергії необхідно використовувати спеціальні кондиціонери (перетворювачі електроенергії), які забезпечують зв'язок із мережею та стабілізацію параметрів струму. Однак розвиток силової електроніки суттєво знизив вартість таких перетворювачів, а також підвищив їхню надійність.

Додатковою перевагою є те, що приріст виробництва електроенергії завдяки роботі турбіни в оптимальних режимах компенсує початкові витрати на встановлення та інтеграцію силової електроніки. Це робить системи зі змінною швидкістю привабливими для сучасних вітроенергетичних проєктів, зокрема в умовах нерівномірного або турбулентного вітрового потоку.

Генератор вітроенергетичної установки працює в лінійній зоні, яка відповідає прямій ділянці залежності крутного моменту генератора від швидкості обертання. Крутний момент генератора регулюється відповідно до оптимальної кривої моменту, яка показана на рис. 2.6, і залежить від поточної швидкості обертання генератора.

Динаміка роботи генератора визначається різницею між моментом турбіни T_m та моментом генератора T_g . Якщо частота обертання генератора менша за оптимальну, момент турбіни перевищує момент генератора, що призводить до прискорення генератора. Навпаки, якщо частота обертання генератора перевищує оптимальне значення, момент генератора стає більшим за момент турбіни, і генератор починає сповільнюватися.

Цей процес регулювання триває доти, доки момент турбіни T_m і момент генератора T_g не зрівняються в точці оптимального моменту T_{m_opt} . У цій точці турбіна працює з максимальною ефективністю, забезпечуючи оптимальне видобування енергії за будь-якої швидкості вітру. Такий підхід дозволяє підтримувати роботу системи на рівні максимальної потужності, що є ключовим для ефективності сучасних вітроенергетичних установок.

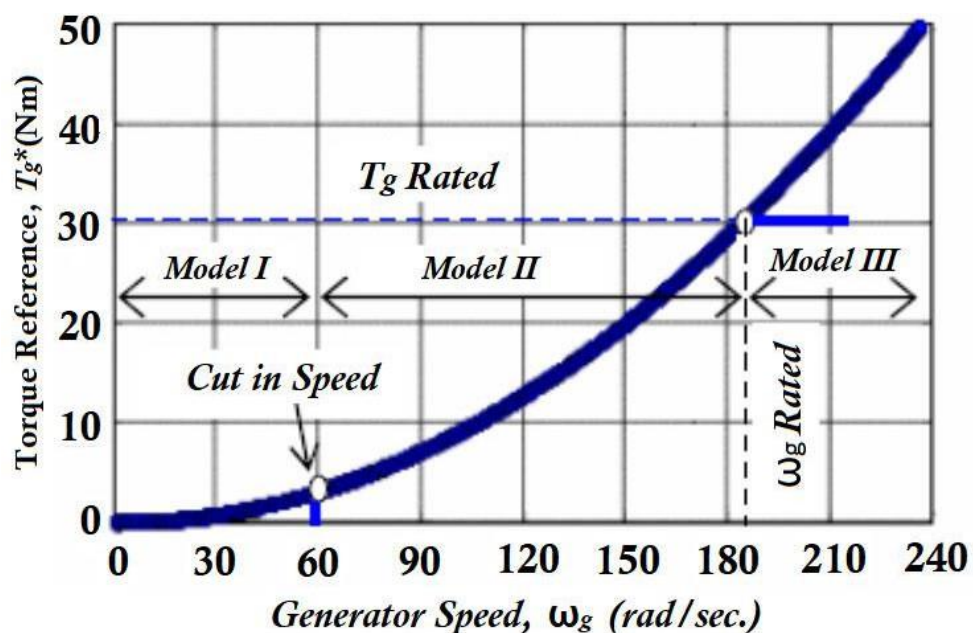


Рис.2.6. Графік залежності крутного моменту МВТ від швидкості обертання ротора.

Як зазначалося раніше, у синхронних генераторах з постійними магнітами (СГПМ) поле збудження створюється постійними магнітами, а не котушками, як у традиційних синхронних генераторах. Ротор обертається із синхронною швидкістю, яка дорівнює швидкості магнітного поля.

СГПМ поділяються на два основні типи залежно від конфігурації ротора:

1. Ротор з випуклим полюсом - у цьому типі ротор має виступаючі полюси, що створюють нерівномірний магнітний потік у повітряному зазорі. Така конструкція зазвичай використовується в системах, де потрібна висока початкова потужність і низька швидкість обертання.

2. Ротор із циліндричною формою - циліндричний ротор має однорідну конструкцію, що забезпечує постійну величину магнітного потоку в повітряному зазорі. Завдяки цьому магнітна міцність і загальна механічна надійність такого ротора вищі, ніж у роторів з випуклим полюсом. Ця конструкція підходить для систем із високими швидкостями обертання, забезпечуючи стабільність і довговічність генератора.

Циліндричні ротори переважають у сучасних вітроенергетичних системах завдяки їхнім конструктивним перевагам і здатності працювати в умовах високих навантажень.

Циліндричний ротор має перевагу в забезпеченні високої точності динамічного балансування порівняно з ротором, оснащеним виступаючими полюсами. Завдяки цій властивості він ідеально підходить для застосування в швидкісних турбогенераторах. У випадку ротора з виступаючими полюсами конструкція передбачає, що полюси виходять за межі центральної частини ротора, тоді як циліндричний ротор зазвичай використовується в машинах із двома або чотирма полюсами.

Додатково варто зазначити, що циліндричний ротор завдяки своїй компактній і симетричній формі знижує вібрації під час обертання, що є критично важливим для турбомашин високої потужності. Він також дозволяє досягати більших швидкостей обертання без ризику пошкодження або зниження ефективності. Турбогенератори з такими роторами знаходять

застосування в енергетиці для виробництва електроенергії на великих ТЕС, АЕС і ГЕС.

Ротор із випуклими полюсами переважно використовується в низькошвидкісних гідрогенераторах, оскільки його конструкція оптимально відповідає вимогам таких машин. Однією з ключових особливостей цього типу ротора є постійність магнітного потоку в повітряному зазорі, що забезпечує стабільність проникності магніторушійної сили незалежно від розташування полюсів та кута нахилу осі магніторушійної сили.

Водночас, у роторах із загостреними (або виступаючими) полюсами магнітна проникність змінюється в залежності від осі магніторушійної сили та кута нахилу полюсів. Це пов'язано зі зміною щільності магнітного потоку в повітряному зазорі, що може призводити до коливань у роботі машини.

Для низькошвидкісних гідрогенераторів ротор із випуклими полюсами забезпечує більш стабільну та ефективну роботу завдяки рівномірному розподілу магнітного потоку. Такі ротори широко застосовуються в системах, де потрібна висока надійність і тривалий термін експлуатації, наприклад, у гідроелектростанціях, які працюють на низьких обертах, але з великим моментом.

Циліндричний ротор є одним із найпоширеніших завдяки своїм численним перевагам. Його симетрична конструкція забезпечує постійний характер магнітного поля, що спрощує моделювання роботи машини, а також аналіз її поведінки в різних режимах. Завдяки цьому інженери отримують можливість швидко і точно проєктувати такі машини, забезпечуючи їхню високу ефективність і надійність.

Зв'язок між частотою генератора f і швидкістю обертання ротора n виражається формулою:

$$f = \frac{pn_z}{120} \quad (2.2)$$

При підключенні до ізолюваного навантаження синхронний генератор працює як незалежне джерело змінної напруги, частота якої визначається швидкістю обертання його первинного двигуна. У цьому режимі частота залишається стабільною лише за умови постійної швидкості двигуна.

Проте у практичному використанні синхронні генератори зазвичай з'єднуються паралельно через лінії електропередач. У такій взаємопов'язаній системі синхронність підтримується навіть при змінах механічного навантаження на генератор або коливаннях електричного споживання. Це досягається завдяки механізмам автоматичного регулювання та впливу системи на кожен окремий генератор.

Переваги паралельного з'єднання синхронних генераторів включають:

1. Безперебійність енергопостачання: у разі зупинки одного з генераторів інші машини продовжують забезпечувати електропостачання.
2. Гнучкість у керуванні: можливість підключати або відключати окремі генератори залежно від рівня споживання електроенергії.
3. Зниження капітальних витрат: спільне використання інфраструктури (наприклад, трансформаторів та ліній електропередач) дозволяє оптимізувати витрати на будівництво та експлуатацію.
4. Ефективність: система дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії за рахунок розподілу навантаження між генераторами.

Крім того, паралельна робота генераторів є основою стабільності енергетичних систем, особливо у великих національних або регіональних мережах, де синхронність і надійність мають критичне значення.

Синхронні двигуни широко використовуються в промисловості завдяки їх здатності працювати на постійній швидкості незалежно від навантаження. Це робить їх ідеальними для застосувань, де потрібна стабільна швидкість, наприклад, у компресорах, насосах, вентиляторах і конвеєрах.

Ще однією значною перевагою синхронних двигунів є можливість легкого регулювання коефіцієнта потужності. Це досягається шляхом зміни струму збудження:

При збільшенні струму збудження двигун може працювати з випереджальним коефіцієнтом потужності, що дозволяє компенсувати реактивну потужність у системі.

При зменшенні струму збудження двигун працює з відстаючим коефіцієнтом потужності, що може бути корисним у специфічних випадках.

Електромагнітний крутний момент спрямований на полюси магнітного поля в бік обертання, забезпечуючи механічну енергію. Таким чином, пристрій виконує функцію двигуна. У випадку, коли вихідна напруга відповідає електрорушійній силі, що виникає в повітряному зазорі, і її частота залишається сталою завдяки зовнішньому трифазному джерелу живлення, машина може функціонувати як генератор або двигун, залежно від умов механічного навантаження на вал. Еквівалентна схема електричної машини, що виконує роль генератора, зображена на рис. 2.7.

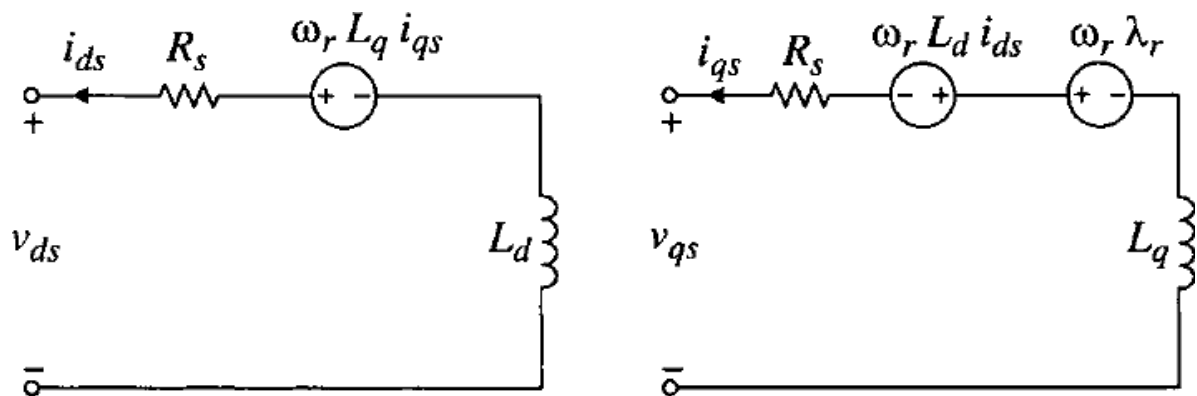


Рис. 2.7. Принципова схема СГПМ

Для магнітогідродинамічних високотемпературних технологій (МВТ) розроблено різні топології перетворювачів потужності. Кожна з них має свої сильні сторони та обмеження. Найбільш поширеним варіантом для перетворення змінного струму в постійний є односпрямований фазовий діодний випрямляч. Трифазний діодний випрямляч, який часто комбінують із перетворювачем постійного струму в постійний, зазвичай обирають замість активних випрямлячів. Це пояснюється такими перевагами, як нижча вартість конструкції, спрощена реалізація контролера та підвищена експлуатаційна

надійність.

Попри очевидні переваги діодних випрямлячів, їх недоліком є обмежена можливість регулювання вихідної напруги, що іноді може впливати на ефективність системи. Для підвищення продуктивності та зниження втрат у деяких випадках застосовують активні випрямлячі, хоча вони є складнішими з точки зору конструкції та управління. Сучасні дослідження спрямовані на оптимізацію топологій для забезпечення максимальної ефективності, надійності та адаптивності до змінних умов роботи.

Конвертор для перетворення постійного струму в інший постійний струм використовується з метою забезпечення максимально ефективного отримання потужності. На рисунку 2.7 зображено систему MBT, яка працює за принципом змінної швидкості та оснащена силовою електронною схемою, що інтегрується із навантаженням постійного струму. Така конфігурація дозволяє оптимізувати енергоспоживання та забезпечує стабільність роботи під час зміни умов навантаження.

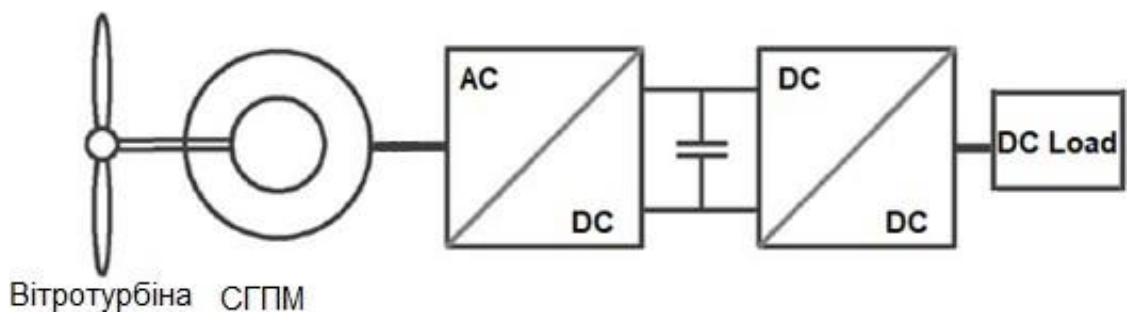


Рис. 2.8. Функціональна схема MBT на основі СГПМ

Трифазні діодні випрямлячі широко застосовуються для трансформації змінного струму, що генерується електричними генераторами, у постійний струм, необхідний для живлення споживачів. Основна роль конденсатора в таких схемах полягає у фільтрації напруги, забезпечуючи її згладження та стабільність. Зазвичай випрямлячі включають компоненти, такі як діоди, IGBT-транзистори, MOSFET-транзистори та тиристори. Схеми, побудовані

виключно на діодах, відносяться до некерованих випрямлячів, оскільки їх робота не передбачає зовнішнього регулювання процесу випрямлення. Такі випрямлячі відзначаються простотою конструкції та високою надійністю, що робить їх популярним вибором для промислових і побутових потреб.

Випрямлячі класифікуються на два основні типи: напівхвильові та повнохвильові. Напівхвильовий випрямляч обробляє лише один півперіод змінного струму — або позитивний, або негативний, в залежності від схеми. У свою чергу, повнохвильовий випрямляч забезпечує перетворення як позитивної, так і негативної частини змінного сигналу, що підвищує ефективність роботи. На рисунку 2.8 представлена схема повнохвильового випрямляча, який складається з трьох діодів. Цей випрямляч живиться змінним струмом від системи максимального вилучення потужності (МВП), яка використовує синхронний генератор із постійними магнітами (СГПМ) для виробництва електроенергії. Такий підхід дозволяє досягти високої ефективності перетворення енергії в системах із змінними навантаженнями.

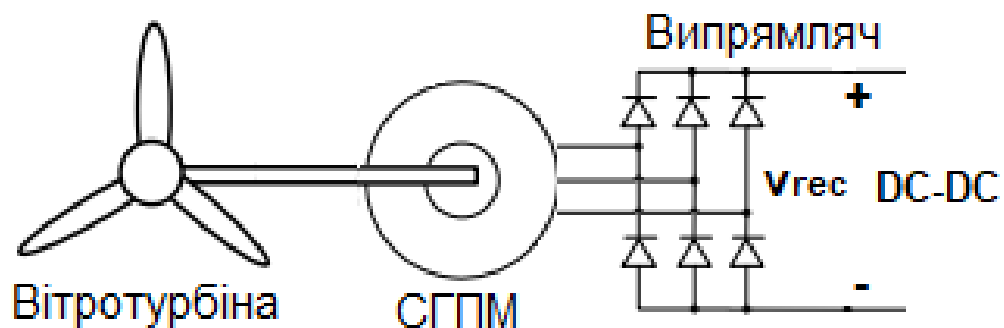


Рис. 2.9. СГПМ приєднаний до трифазного випрямляча

Зазвичай трифазний діодний випрямляч складається з двох груп діодів. Перша група підключається до позитивної шини вихідного постійного струму, тоді як друга група з'єднана з негативною шиною. У процесі роботи діоди з першої групи проводять струм під час позитивного напівперіоду змінного сигналу, а діоди з другої групи активуються протягом негативного напівперіоду. Така конфігурація забезпечує безперервний потік постійного

струму на виході, що є важливим для стабільної роботи підключеного обладнання. Крім того, трифазні діодні випрямлячі відзначаються високою ефективністю завдяки рівномірному навантаженню фаз і меншій кількості пульсацій на виході порівняно з однофазними схемами.

Конструкція некерованих мостових випрямлячів вимагає ретельного вибору діодів, щоб забезпечити їх надійну роботу під заданими умовами. Зокрема, діоди повинні мати відповідну напругу блокування, яка визначається максимальною зворотною напругою, що вони здатні витримати без пробою. Також важливо враховувати максимальний струм провідності діодів, оскільки він має відповідати навіть потенційним перенапругам у системі. Струм провідності — це струм, який проходить через діод у прямому напрямку, коли той знаходиться у провідному стані.

Окрім діодів, у конструкції випрямляча передбачено використання згладжуючого фільтра, який дозволяє мінімізувати пульсації та забезпечити плавний вихід постійного струму. Також випрямляч оснащується радіатором для ефективного відведення тепла, що виникає внаслідок роботи діодів, особливо за умов високого навантаження. Така конструкція забезпечує стабільність роботи випрямляча навіть у жорстких експлуатаційних умовах.

У цьому дослідженні розглядається підвищувальний перетворювач постійного струму, призначений для збільшення напруги в мікромережі постійного струму, що працює у складі системи максимального вилучення потужності (МВП). Його основне завдання — забезпечення живлення побутових приладів у разі аварійного відключення електроенергії. Передбачається, що даний перетворювач зможе забезпечувати стабільну напругу 240 В постійного струму для навантаження з максимальною потужністю 3 кВт.

Підвищення напруги до 240 В сприяє зниженню величини вихідного струму, що, своєю чергою, дозволяє зменшити теплові втрати у провідниках і підвищити загальну ефективність системи. Такий підхід є критично важливим для оптимізації енергоспоживання, особливо в умовах обмежених ресурсів

мікромереж. Крім того, конструкція підвищувального перетворювача передбачає використання енергоефективних компонентів, які забезпечують тривалу та стабільну роботу при мінімальних енергетичних втратах."

Типова конструкція підвищувального перетворювача включає три основні компоненти: діод, перемикач і накопичувач енергії. Як правило, роль перемикаючого елемента виконує IGBT-транзистор завдяки його високій ефективності та здатності працювати з великими струмами. Накопичувачем енергії зазвичай виступає індуктивна котушка, яка забезпечує зберігання енергії під час роботи перетворювача.

Коли підвищувальний перетворювач працює під управлінням контролера МРРТ (контролера максимальної точки потужності), він не лише підвищує напругу, а й підтримує її стабільність для досягнення максимальної потужності (МРР). Контролер МРРТ розраховує точний коефіцієнт навантаження, який дозволяє керувати підвищувальним перетворювачем в оптимальному напрямку. Завдяки цьому забезпечується швидке та точне досягнення максимальної точки потужності, що є важливим для підвищення ефективності енергетичних систем, особливо в умовах змінного навантаження чи непостійного джерела енергії, такого як сонячні батареї чи вітряні генератори.

2.5 Використання МРРТ в малих вітрових турбінах

Реалізація МРРТ (методу пошуку точки максимальної потужності) базується на безпосередньому регулюванні ефективності роботи підвищувального перетворювача, який перетворює постійний струм у постійний струм. У методі збурення та спостереження (Р&О), де застосовується фіксований розмір кроку, для мінімізації коливань поблизу оптимальної робочої точки можна адаптувати коефіцієнт завантаження. Це досягається шляхом динамічного коригування величини кроку ΔD на кожному етапі в залежності від умов роботи системи. Пошук максимальної потужності

можливий за умови виконання відповідного рівняння, яке забезпечує оптимальне регулювання параметрів системи.

Цей метод є одним із найпоширеніших підходів у фотогальванічних системах для забезпечення ефективного перетворення енергії, особливо в умовах змінної інтенсивності сонячного випромінювання. Серед переваг підходу можна відзначити його простоту реалізації та відносно низькі обчислювальні витрати, що робить його придатним для використання в різноманітних енергетичних системах. Рівняння для отримання MPPT має вигляд:

$$\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} = 0 \quad (2.2)$$

де P_{dc} і V_{dc} – значення потужності і напруги ланки постійного струму.

Крива, що показує залежність потужності постійного струму (P_{dc}) від напруги постійного струму (V_{dc}), має єдину точку, в якій можна досягти максимальної потужності. Це означає, що для визначення цієї точки можна застосувати покроковий пошук, без необхідності врахування зовнішніх факторів, таких як швидкість вітру або інші змінні середовища.

Такий підхід забезпечує точне визначення робочої точки системи, спрощуючи алгоритм пошуку. Зокрема, у фотогальванічних системах це дозволяє ефективно знаходити оптимальну напругу та струм для забезпечення максимальної ефективності перетворення енергії. Метод покрокового пошуку є особливо зручним у випадках, коли системі притаманні стабільні або передбачувані умови експлуатації, адже він не залежить від складних зовнішніх факторів.

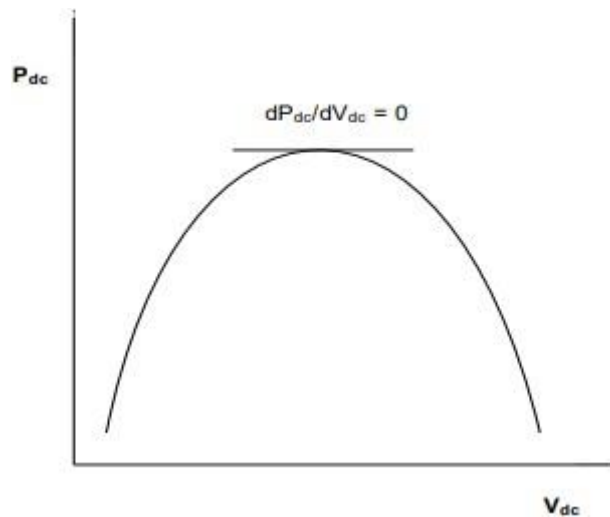


Рис. 2.10. Графік залежності P_{dc} від V_{dc}

Зміна коефіцієнта завантаження відбувається відповідно до напрямку нахилу залежності dP_{dc}/dV_{dc} . У зоні високих значень характеристики генератора (рис. 2.10) коефіцієнт завантаження збільшується. Це спричиняє зменшення частоти обертання ротора генератора, внаслідок чого потужність системи зростає, доки регулятор не досягне точки максимальної потужності (MPP).

Навпаки, якщо початкова робоча точка знаходиться в зоні низьких швидкостей, коефіцієнт завантаження зменшується відповідно до нахилу. Це викликає поступове збільшення частоти обертання ротора, що дозволяє регульованій змінній параметра наближатися до точки MPP.

Такий підхід забезпечує динамічне налаштування параметрів системи, гарантуючи ефективний процес пошуку оптимальної точки роботи генератора. Алгоритм, заснований на цьому принципі, широко використовується в енергетичних системах, зокрема у вітроенергетичних установках та фотогальванічних системах, де ефективне регулювання потужності є ключовим для стабільності та продуктивності.

Схема мікромережі постійного струму на основі МВТ з керуванням P&O MPPT показана на рис. 2.10.

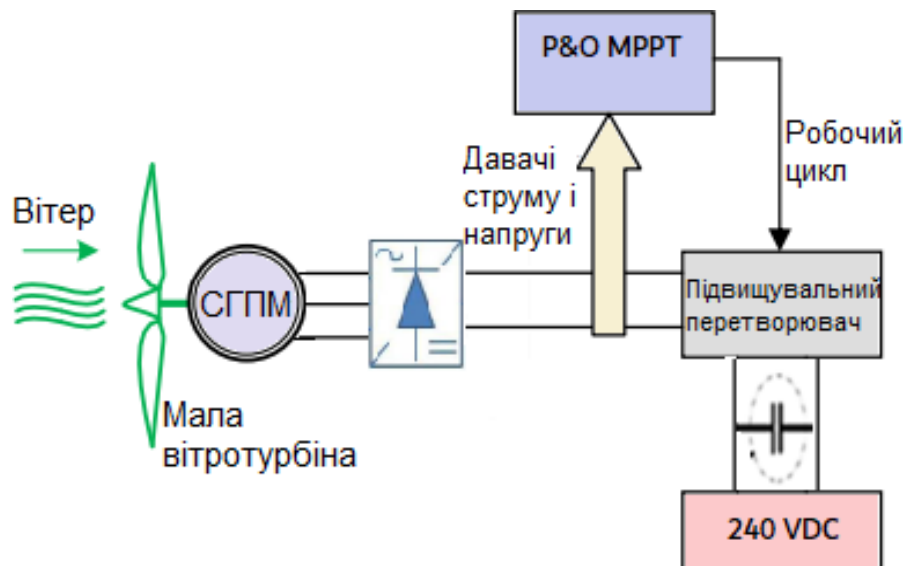


Рис. 2.11. Схема мікромережі постійного струму на базі MBT із P&O керуванням

Метод P&O (Perturb and Observe) є ефективним підходом до оптимізації, який базується на пошуку локального оптимуму заданої функції. Він спрямований на визначення ідеальної робочої точки системи, що дозволяє досягти максимальної ефективності енергетичного перетворення. Основний принцип методу полягає у введенні невеликого збурення в керуючу змінну та аналізі реакції цільової функції. Процес триває до тих пір, поки нахил залежності цільової функції не стане рівним нулю, що вказує на досягнення точки максимальної потужності (MPP).

Як проілюстровано на рис. 2.11, регулятор аналізує положення робочої точки відносно пікової точки і визначає напрямок її зміщення. Якщо робоча точка знаходиться в лівій зоні від піку, вона поступово зміщується вправо, і навпаки. У процесі роботи коефіцієнт корисної дії підвищувального перетворювача модифікується, а потужність ланки постійного струму постійно контролюється.

Однією з ключових переваг цього методу є те, що він не вимагає використання механічних датчиків для вимірювання таких зовнішніх параметрів, як швидкість вітру. Завдяки цьому метод P&O є простим, доступним у впровадженні та широко застосовуваним у системах генерації

енергії, зокрема у сонячних і вітрових установках. Крім того, його гнучкість та низькі обчислювальні витрати роблять його одним із найбільш популярних підходів у галузі відновлюваної енергетики.

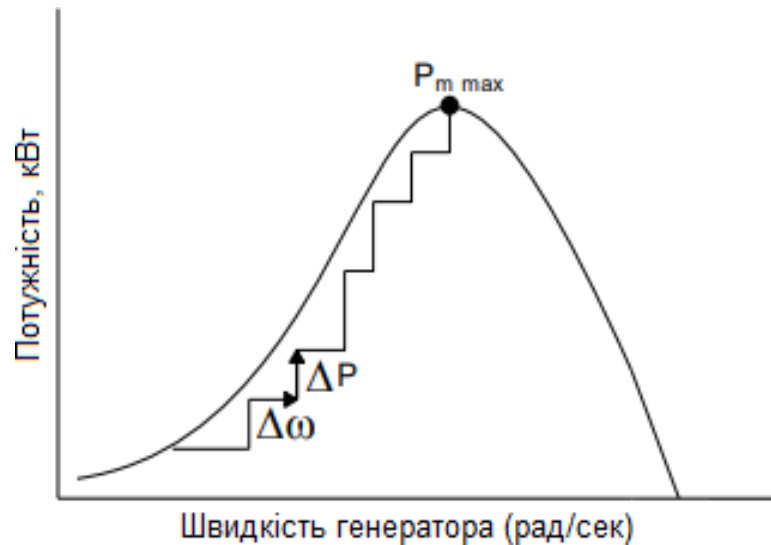


Рис. 2.12. Графік залежності потужності МВТ від швидкості обертання валу генератора

Був розроблений удосконалений алгоритм R&O MPRT, який забезпечує швидке відстеження точки максимальної потужності (MPP) навіть за умов швидких змін швидкості вітру. Ця методика MPRT не вимагає попередньої інформації про параметри вітрової турбіни або використання механічних датчиків, що значно спрощує її впровадження в системах.

Алгоритм працює у двох різних режимах, що дозволяє вирішити обмеження традиційного методу R&O. Перехід між режимами здійснюється залежно від швидкості зміни вітру. У разі повільних змін швидкості використовується стандартний режим R&O з малим кроком, який забезпечує стабільне наближення до MPP. Однак за умов різких змін швидкості активується режим прогнозування. У цьому режимі алгоритм швидко зміщує робочу точку системи поблизу максимальної ефективної точки (MPP), зменшуючи втрати енергії.

Для визначення швидких змін швидкості вітру використовується аналіз

напруги на ланці постійного струму. Цей підхід дозволяє уникнути необхідності використання зовнішніх датчиків і забезпечує високу чутливість до змін у системі. Завдяки такій адаптивності запропонований алгоритм демонструє ефективність у відновлюваній енергетиці, особливо у вітрових установках, де швидкість вітру є змінною і непередбачуваною величиною.

Ця стратегія є значним кроком уперед у підвищенні ефективності вітроенергетичних систем, дозволяючи оптимізувати виробництво енергії навіть у складних умовах експлуатації.

Алгоритм P&O (Perturb and Observe) функціонує за наступним принципом. На першому етапі вимірюється потужність системи на основі поточного значення напруги та струму. Отримане значення порівнюється з попередньо зафіксованою потужністю. Якщо різниця дорівнює нулю, напруга залишається незмінною, а алгоритм утримує систему в тій самій зоні, намагаючись зберегти робочу точку поблизу максимальної потужності (MPP).

Якщо ж виявлено зміну потужності, алгоритм продовжує виконання, аналізуючи різницю між поточним і попереднім значеннями напруги. У разі позитивної різниці потужностей алгоритм коригує напругу в тому ж напрямку, що й раніше: підвищує або знижує її, залежно від зміни. Якщо різниця напруг також позитивна, алгоритм продовжує поступово збільшувати напругу. У випадку негативної різниці алгоритм змінює напрямок, зменшуючи напругу.

Цей підхід дозволяє алгоритму ефективно стежити за робочою точкою системи, забезпечуючи її наближення до зони MPP. Методика P&O добре підходить для систем із повільно змінними параметрами, наприклад, у сонячній енергетиці, але може бути адаптована для більш динамічних умов шляхом оптимізації величини кроку або впровадження додаткових корекційних механізмів. Завдяки своїй простоті та ефективності, алгоритм є одним із найпоширеніших у відновлюваних джерелах енергії.

Якщо різниця потужностей є від'ємною, алгоритм змінює напрямок коригування напруги на протилежний. У такому разі зміна напруги буде від'ємною, що змушує алгоритм збільшувати напругу. З іншого боку, якщо

зміна напруги є позитивною, алгоритм знижує її, коригуючи робочу точку в напрямку оптимального режиму.

Цей механізм дозволяє алгоритму P&O гнучко керувати робочою напругою шляхом регулювання коефіцієнта завантаження. Зміна цього коефіцієнта безпосередньо впливає на вхідний опір DC-DC перетворювача, що, у свою чергу, змінює робочу напругу. Таким чином, алгоритм забезпечує можливість адаптивного налаштування напруги залежно від умов роботи, охоплюючи чотири можливі сценарії змін.

Ця властивість робить метод P&O універсальним інструментом для пошуку точки максимальної потужності (MPP) у різних енергетичних системах. Завдяки здатності динамічно змінювати параметри роботи, він забезпечує високу ефективність енергетичного перетворення, особливо в системах із варіабельними умовами, таких як фотогальванічні та вітроенергетичні установки.

Вихідна напруга підвищувального перетворювача постійного струму залежить від коефіцієнта завантаження, який є основним параметром, що визначає режим його роботи. На рис. 2.13 зображено схему такого перетворювача, керованого за допомогою MPPT-контролера. Вхід контролера підключений до датчиків напруги та струму, які здійснюють вимірювання параметрів на виході МВТ (модуля відновлюваної енергії) після каскаду випрямлення.

На основі вимірних параметрів оцінюється поточна потужність системи, яка порівнюється з попереднім значенням. Знак різниці потужностей визначає, як саме слід коригувати коефіцієнт завантаження на виході контролера MPPT. Цей коефіцієнт є ключовою керуючою змінною, яка впливає на вихідну напругу перетворювача.

Збурення коефіцієнта завантаження викликає зміну струму постійного струму (СРП), що, у свою чергу, призводить до зміни напруги СРП. Для забезпечення стабільної та безпечної роботи система обмежує діапазон коефіцієнта завантаження між нулем і максимально допустимим значенням,

яке гарантує підвищення вхідної напруги в межах заданих обмежень.

Така схема забезпечує ефективне керування підвищувальним перетворювачем, дозволяючи максимально адаптувати його роботу до змінних умов експлуатації. Цей підхід широко використовується в системах відновлюваної енергетики для оптимального перетворення та передачі енергії.

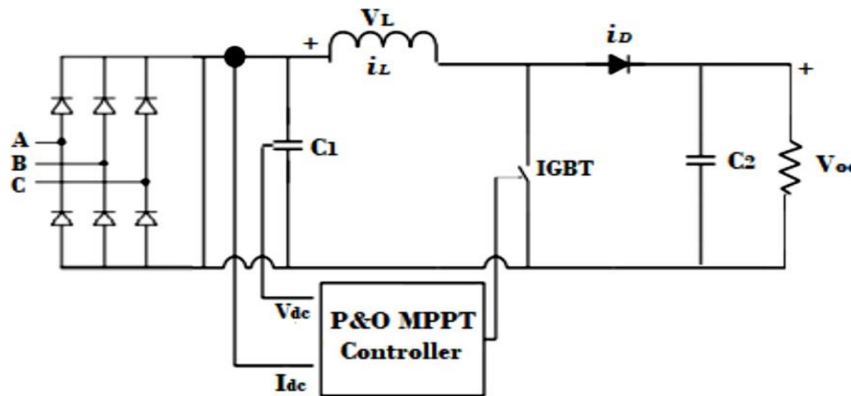


Рис. 2.13. Перетворювач напруги з контролером P&O MPPT.

Вибір коефіцієнта завантаження є ключовим фактором для забезпечення ефективної роботи системи. Оскільки методика P&O (Perturb and Observe) базується на коливаннях навколо точки максимальної потужності (MPP), зменшення кроку зміни коефіцієнта завантаження дозволяє мінімізувати амплітуду цих коливань і, як наслідок, знижує втрати в усталеному режимі.

Проте зменшення кроку має і недоліки. У ситуаціях, коли атмосферні умови, такі як освітленість чи швидкість вітру, швидко змінюються, регулятор з малим кроком стає менш ефективним. У таких випадках швидкість реагування системи може бути недостатньою для забезпечення оперативного відстеження нової точки MPP, що призводить до втрат енергії.

Коефіцієнт завантаження визначається за наступним рівнянням:

$$a = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} \frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} = 0 \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) описує принцип роботи контролера MPPT, який регулює роботу вітроелектричної установки (ВЕУ) у точці максимальної потужності (MPP) залежно від швидкості вітру. Якщо робоча напруга генератора збурюється в певному напрямку і це збурення наближає робочу точку до MPP, алгоритм P&O продовжує збурення в тому ж напрямку. У разі, якщо зміщення робочої точки віддаляє її від MPP, алгоритм змінює напрямок збурення на протилежний.

Таким чином, система здійснює регулювання, збільшуючи або зменшуючи робочу напругу, а також спостерігаючи за її впливом на вихідну потужність. Цей процес є циклічним: на кожному етапі MPPT збурення робочої напруги оцінюється, і на основі отриманих даних система приймає рішення про подальший напрямок зміни.

Коли точка максимальної потужності досягнута, напруга буде коливатися поблизу ідеального значення, що дозволяє підтримувати стабільність системи. Наприклад, якщо контролер фіксує зростання вхідної потужності разом із підвищенням напруги, він зменшить опорне значення напруги, забезпечуючи її близькість до MPP.

Такий підхід дозволяє ефективно адаптувати роботу ВЕУ до змінних умов вітру, зводячи втрати енергії до мінімуму і забезпечуючи стабільну роботу установки навіть за динамічних умов експлуатації.

Висновки до розділу

1. Проектування мікромережі має враховувати інтеграцію різних типів відновлюваних джерел енергії (сонячна, вітрова енергетика тощо) та систем накопичення енергії, щоб забезпечити її ефективну роботу як у режимі підключення до центральної мережі, так і в автономному режимі. Це дозволяє надійно забезпечувати електропостачання навантажень навіть у разі перебоїв у централізованому енергопостачанні.

2. Дослідження проектування мікромережі постійного струму зосереджено на використанні малої вітрової турбіни як основного джерела енергії. Такий підхід є перспективним завдяки низькому рівню втрат у системах постійного струму, а також можливості їхньої гнучкої адаптації до локальних умов.

3. Автономна мала вітрова турбіна в мікромережах постійного струму розглянута через призму ключових аспектів, таких як вибір оптимального місця встановлення, застосування сучасних технологій, розробка топологій силових електронних перетворювачів та використання методів визначення точки максимальної потужності (MPP). Таке дослідження спрямоване на оптимізацію роботи мікромережі з урахуванням її ефективності та стабільності в автономному режимі.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ МЕРЕЖІ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

3.1 Математична модель ВЕУ для живлення мережі побутових споживачів

У дослідженні запропоновано модель автономної мікромережі постійного струму для малих вітроелектростанцій (МВТ). Ця система розроблена для використання як додаткове джерело електроенергії в житлових будинках, забезпечуючи стабільне живлення таких пристроїв, як світлодіодне освітлення, комп'ютерна техніка, приводи з можливістю регулювання швидкості та інше обладнання. Основна мета – мінімізувати або повністю усунути перебої в електропостачанні. Зазвичай такі вітроенергетичні установки (ВЕУ) належать до категорії горизонтально-осьових вітрогенераторів (ГВГУ), які можуть встановлюватися на низьких вежах висотою кілька метрів, дахах будівель або конструкціях, таких як антени мобільного зв'язку.

Додатково зазначимо, що сучасні МВТ дедалі частіше інтегрують із системами накопичення енергії на основі акумуляторів, що дозволяє зберігати надлишкову енергію для її використання в періоди низької генерації. Такі рішення забезпечують підвищення надійності та енергоефективності системи, сприяючи також зниженню залежності від центрального електропостачання.

У вітроенергетичних установках (ВЕУ) аеродинамічний модуль напряму з'єднаний із турбіною без використання систем передачі. Під дією вітру турбіна починає обертатися, генеруючи електроенергію. Така конструкція сприяє підвищенню ефективності енергопостачання різних об'єктів, зокрема житлових будинків, ферм, навчальних закладів, невеликих комерційних підприємств чи навіть віддалених громадських об'єктів. Подібні

системи є вигідними та ефективними, особливо в регіонах із значним вітровим потенціалом.

Додатково, їхня простота в конструкції зменшує потребу в обслуговуванні та забезпечує високу надійність. Завдяки таким перевагам, ВЕУ стають ключовим елементом децентралізованих енергетичних систем, сприяючи переходу до більш стійкого та екологічного енергоспоживання.

Автономна мікромережа постійного струму на базі малої вітроелектростанції (МВТ) здатна генерувати 3 кВт потужності при напрузі 120 В постійного струму, а її робота прогнозується з можливістю видачі 3 кВт при напрузі 240 В постійного струму. Структурна схема цієї системи, подана на рисунку 3.1, включає наступні основні компоненти: малу вітроелектростанцію з синхронним генератором з постійними магнітами (СГПМ), трифазний діодний мостовий випрямляч, конденсатор ланки постійного струму, а також підвищувальний DC-DC перетворювач, що забезпечує підключення до постійного навантаження.

Додатково, така конструкція сприяє підвищенню стабільності напруги та забезпечує ефективне перетворення енергії, що дозволяє її використовувати для живлення різноманітного обладнання. Використання СГПМ гарантує високий ККД та тривалий термін експлуатації системи, а підвищувальний перетворювач забезпечує гнучкість у підтримці потрібних параметрів для навантажень.

Конденсатор ланки постійного струму відіграє ключову роль у стабілізації напруги на шині постійного струму. Для забезпечення максимальної потужності та регулювання вихідної напруги перетворювача застосовується вдосконалений алгоритм відстеження точки максимальної потужності (P&O MPPT). Цей алгоритм дозволяє швидко і точно визначати MPP, забезпечуючи стабільність напруги навіть за умови змінної швидкості вітру.

Для оцінки ефективності роботи розробленої системи була створена модель мікромережі постійного струму МВТ у середовищі MATLAB Simulink.

Отримані результати моделювання представлені у наступному розділі та демонструють переваги розробленого підходу у забезпеченні стабільного електропостачання.

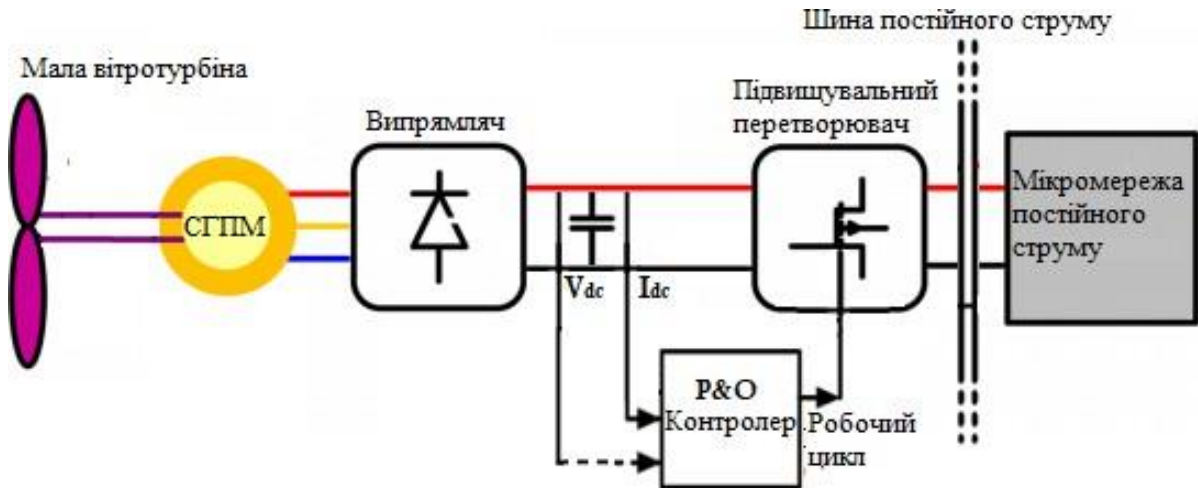


Рис. 3.1. Структурна схема МВТ, приєднаної до мікромережі

У досліджуваній мікромережі постійного струму на базі малої вітроелектростанції (МВТ) генерується потужність 3 кВт при напрузі 240 В постійного струму. Система призначена для забезпечення електроенергією домогосподарства в разі відключення основної електромережі. Передбачено живлення таких пристроїв, як світлодіодне освітлення, персональний комп'ютер, зарядний пристрій для мобільного телефону, телевізор, принтер, кавоварка, вентилятор, радіоприймач, холодильник та фен.

Інформація про енергоспоживання кожного пристрою, їхню кількість і тривалість роботи наведена в Таблиці 3.1. Ці дані допомагають оптимізувати розподіл енергії та забезпечити стабільне функціонування всіх критично важливих пристроїв у межах доступної потужності мікромережі.

3.1.1. Аеродинамічна модель вітрової турбіни. Зв'язок між значенням швидкості та величиною вихідної потужності МВТ має вигляд:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \lambda, \beta \quad (3.1)$$

Коефіцієнт потужності можна визначається згідно виразу:

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

Взаємозв'язок між співвідношенням швидкості обертання наконечника і кутом нахилу має вигляд:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,089\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3.2)$$

Вираз для знаходження механічного крутного моменту вітрової турбіни має вигляд:

$$\tau_w = \frac{P_m}{\omega} \quad (3.3)$$

де ω – значення частоти обертання ротора МВТ.

На рис. 3.2 наведено Simulink-модель аеродинаміки вітрової турбіни, яка була розроблена на основі наведених вище рівнянь.

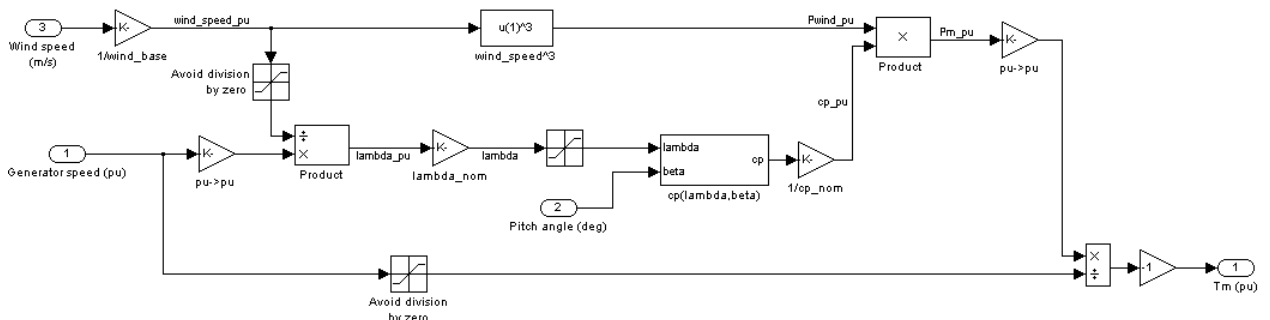


Рис. 3.2. Simulink-модель аеродинаміки МВТ

Для вітрогенераторів із нульовим кутом нахилу лопатей максимальний

коефіцієнт потужності становить 0,48. На рисунку 3.3 представлена крива енергетичних характеристик розглянутої малої вітроелектростанції (МВТ), нормалізована для різних швидкостей вітру за умов нульового кута тангажу. Максимальний коефіцієнт потужності досягається при оптимальному співвідношенні швидкості кінчика лопаті до швидкості вітру, коли лопаті мають нульовий кут нахилу.

З аналізу кривої на рисунку 3.3 видно, що для кожної швидкості вітру існує конкретна точка на енергетичній характеристиці, в якій потужність досягає свого пікового значення. Ця точка відповідає оптимальному режиму роботи вітрогенератора, що забезпечує найбільшу ефективність перетворення енергії вітру в електричну енергію.

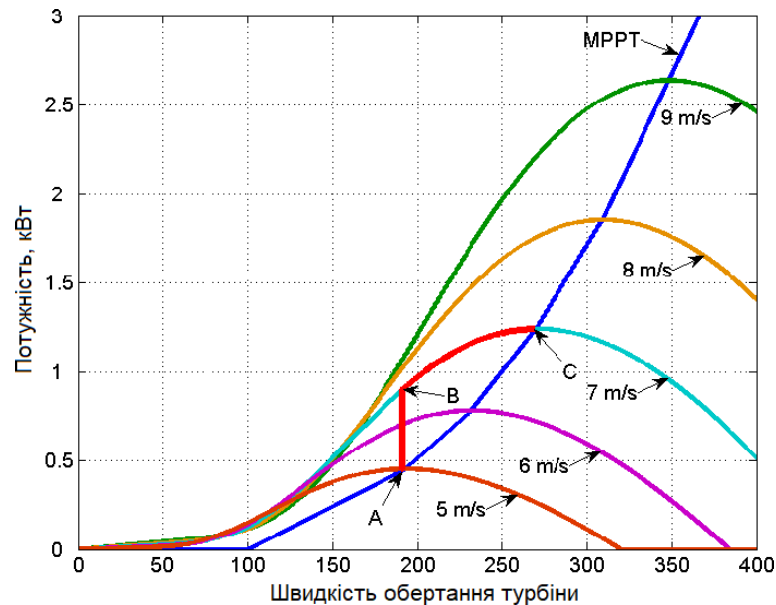


Рис. 3.3. Характеристика потужності МВТ з МРРТ

Зв'язок між значенням оптимального співвідношення частоти обертання наконечника і швидкістю обертання турбіни Ω_n можна описати виразом :

$$\Omega_n = \lambda_{opt} \frac{V_n}{R} \quad (3.3)$$

де V_n – це швидкість вітру.

3.1.2. Математична модель СГПМ. Динаміка синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) описується через математичні моделі напруги, струму та частоти обертання ротора. Ці параметричні моделі є універсальними, що дозволяє їх застосовувати незалежно від розмірів генератора. Для створення таких моделей необхідно визначити схему, яка враховує основні характеристики генератора, включаючи внутрішню напругу, активний опір та реактивний опір.

Після побудови математичних моделей вони можуть бути перетворені в еквівалентні схеми у двовісній системі координат. У цьому розділі моделювання статора і ротора генератора виконується в системі координат $dq0$, що дозволяє ефективно аналізувати його електромагнітну динаміку та забезпечує точність розрахунків у процесах перехідного режиму і стійкої роботи.

На рисунку 3.4 представлена фазова діаграма, що ілюструє процес перетворення координат abc у $dq0$. У цій діаграмі вісь d орієнтована вздовж північного полюса ротора, тоді як вісь q знаходиться під кутом 90° попереду осі d у напрямку обертання. Це розташування забезпечує зручність аналізу змінних у двовісній системі координат, що використовується для моделювання електромагнітних процесів у синхронних генераторах з постійними магнітами.

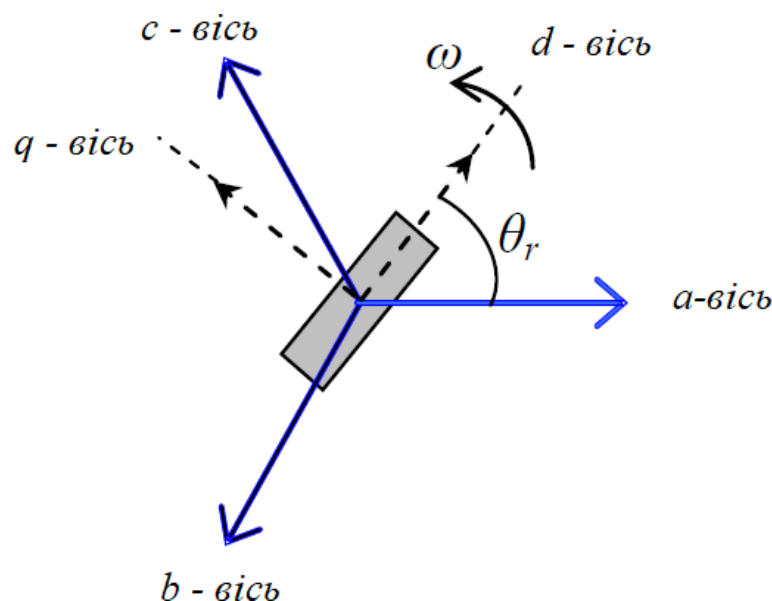


Рис. 3.4. Ілюстрація до перетворення координат abc - dq

Напруга СГПМ в dq0 координатах визначається за виразами:

$$v_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q \quad (3.6)$$

$$v_q = R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega_e i_d + \psi \omega_e \quad (3.7)$$

Магнітний потік визначається наступним чином:

$$\psi_q = L_q i_q \quad (3.8)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_{PM} \quad (3.9)$$

ω_e - це електрична кутова швидкість:

$$\omega_e = p_n \omega_m \quad (3.10)$$

Електромагнітний момент ПМСГ визначається за формулою:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \left[L_{sd} - L_{sq} i_{sd} i_{sq} + \psi_{PM} i_{sq} \right]. \quad (3.11)$$

У випадку, поверхневого монтажу ПМСГ, і коли $L_d = L_q$, рівняння (3.11) набуває вигляду:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_{PM} i_{sq}. \quad (3.12)$$

Рівняння руху ПМСГ має вигляд:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} T_e - T_m - F\omega_m \quad (3.13)$$

Активна і реактивна потужності ПМСГ визначаються за виразами:

$$P_{gen} = \frac{3}{2} [v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}] \quad (3.14)$$

$$Q_{gen} = \frac{3}{2} [v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}] \quad (3.15)$$

3.1.3. Математична модель силовій електроніки ВЕУ. Основна функція електронних силових пристроїв полягає в оптимальному управлінні та контролі потоку електроенергії. Це досягається шляхом регулювання напруги і струму за допомогою напівпровідникових компонентів, які забезпечують відповідність параметрів живлення вимогам навантаження. Система керування для таких пристроїв зазвичай реалізується за допомогою лінійних схем та/або цифрових сигнальних процесорів.

Контролер, що використовується в перетворювачах потужності, порівнює вихідні параметри з еталонними значеннями і, зменшуючи похибку між ними, забезпечує стабільність і точність роботи системи. Потік енергії в силових електронних блоках може бути оборотним завдяки використанню достатньої кількості напівпровідникових компонентів, що дозволяє змінювати ролі між входами і виходами залежно від вимог.

У цьому розділі розглядаються моделювання випрямляча та підвищувального перетворювача, які є ключовими компонентами силовій електроніки для забезпечення ефективного перетворення та розподілу енергії.

3.1.4. Модель перетворювача змінного струму в постійний.

Некеровані трифазні випрямлячі є типом трифазних перетворювачів, що застосовуються для забезпечення живлення кола постійного струму від джерела змінного струму. В їхній конструкції використано діоди, які утворюють три плечі, кожне з яких містить по два діоди. Загалом у схемі таких випрямлячів налічується шість діодів.

На рисунку 3.7 представлено схему трифазного повнохвильового діодного мостового випрямляча. Ця схема широко використовується завдяки своїй простоті, ефективності та здатності забезпечувати стабільне перетворення трифазної змінної напруги в постійну.

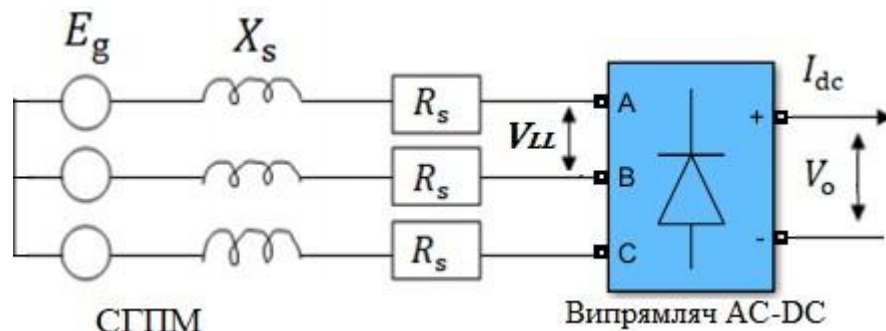


Рис. 3.5. 3-фазний повномостовий випрямляч з СГПМ

Середнє значення вихідної напруги випрямляча можна знайти за формулами:

$$V_o = \frac{1}{3} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{6} V_{LL} \cos \omega t \, d \omega t \quad (3.16)$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \quad (3.17)$$

де V_{LL} – лінійна напруга.

3.1.5. Модель підвищувального перетворювача постійного струму в постійний. Основною метою проєктування підвищувального перетворювача постійного струму (див. рис. 3.6) є забезпечення стабільної вихідної напруги постійного струму для живлення постійного навантаження автономної мікромережі постійного струму МВТ, попри змінні входні параметри.

Підвищувальний перетворювач дозволяє збільшувати напругу на виході, зменшуючи при цьому струм, водночас зберігаючи сталу потужність. Це робить його ключовим компонентом у системах з нестабільними джерелами енергії, такими як вітроелектростанції, забезпечуючи оптимальне перетворення та розподіл енергії.

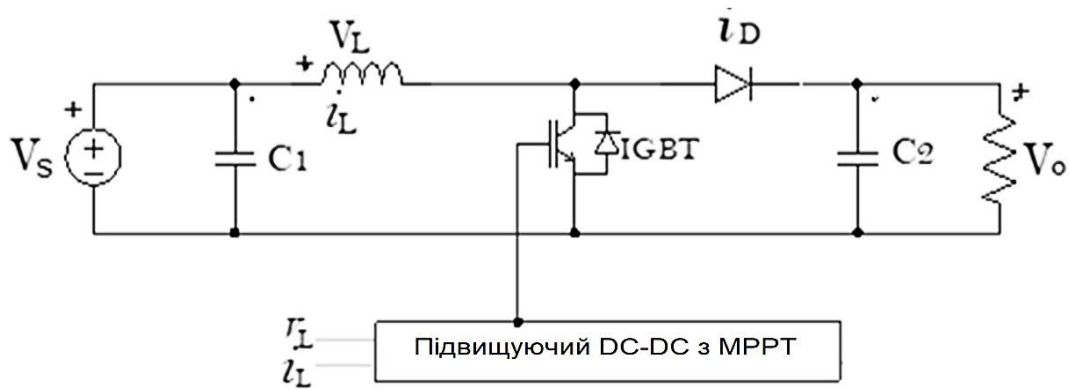


Рис. 3.6. Схема підвищувального перетворювача постійного струму

Застосування високих частот перемикання є вигідним, оскільки це дозволяє зменшити розміри індуктивності та конденсатора. Чим вища частота перемикання, тим менший мінімальний розмір індуктивності, необхідний для забезпечення безперервного струму, а також менший мінімальний розмір конденсатора для зменшення пульсацій на виході.

Однак, підвищення частоти перемикання має і свої недоліки — це може спричинити збільшення втрат потужності в комутаційних елементах, що негативно впливає на загальну ефективність перетворювача. Зазвичай частота перемикання перевищує 20 кГц, щоб уникнути виникнення чутного шуму, і може досягати діапазону мегагерц для застосувань, які потребують компактних компонентів та швидкого відгуку.

Думки розробників щодо оптимальної частоти перемикання різняться. Деякі вважають, що частота близько 500 кГц є найкращим компромісом між зменшенням розмірів компонентів і збереженням високої ефективності. Інші віддають перевагу частотам перемикання близько 50 кГц, акцентуючи увагу на зменшенні втрат енергії під час комутації. Разом із цим є й ті, хто використовує частоти вище 1 МГц, орієнтуючись на додаткові переваги в компактності та швидкодії, які можуть бути важливими для специфічних застосувань.

Взаємозв'язок між напругою та струмом у підвищувальному перетворювачі (рис. 3.7) аналізується шляхом дослідження поведінки напруги й струму на індуктивності в різних станах перемикача: коли він знаходиться у замкнутому стані та коли розімкнутий. Такий підхід дозволяє оцінити динамічні характеристики перетворювача та визначити ключові параметри для його оптимального функціонування.

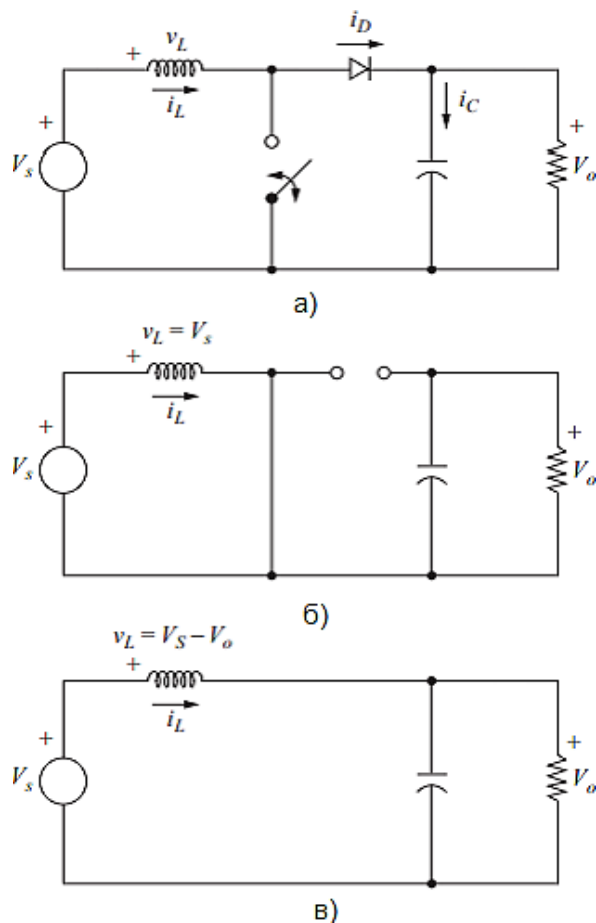


Рис. 3.7. Схеми підсилювального перетворювача (а) – схема; (б) – схема при замкненому ключі; (в) – схема при розімкненому ключі

Коли перемикач замкнений (рис. 3.7а), в діоді наявне зворотне зміщення, і другий закон Кірхгофа має вигляд:

$$V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.18)$$

Змінення струму в котушці індуктивності відбувається згідно рівнянь:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (3.19)$$

$$\Delta i_{L \text{ closed}} = \frac{V_s DT}{L} \quad (3.20)$$

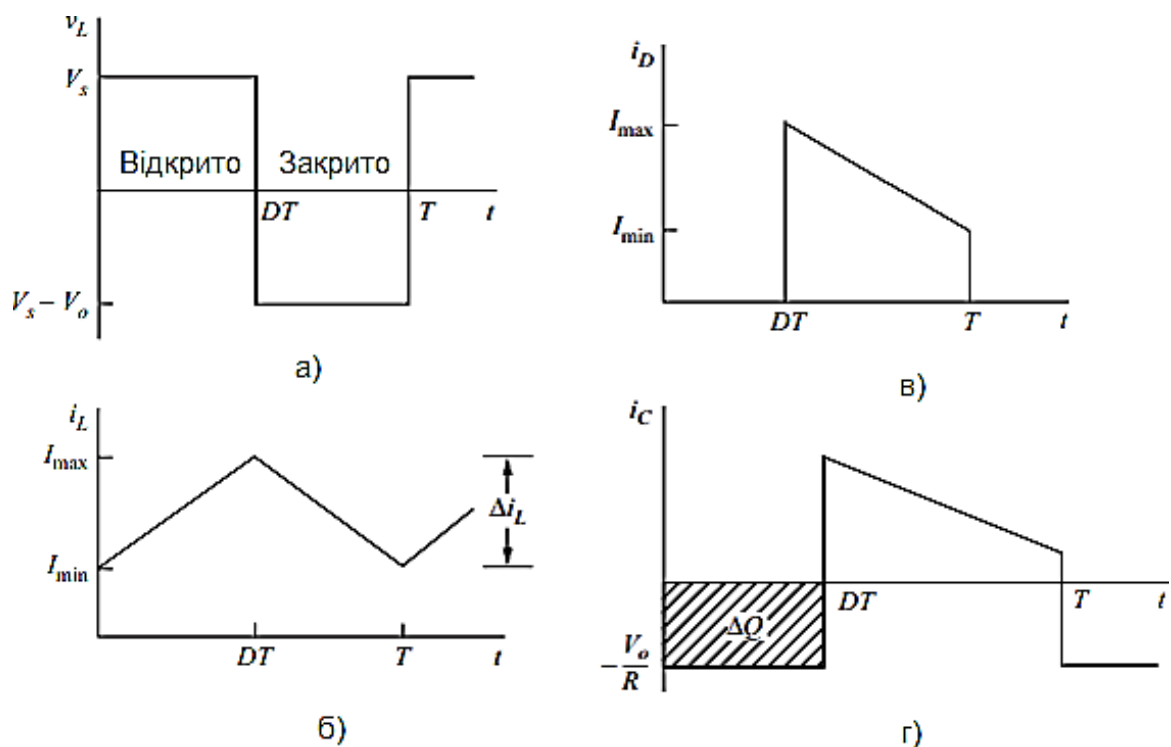


Рис. 3.8 Напруга (а) і струм (б) котушки індуктивності; струм діода (в) і струм конденсатора (г)

Коли вимикач розімкнений, тому:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.21)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (3.22)$$

Зміна струму індуктора описується рівняннями:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{1-D T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (3.23)$$

$$\Delta i_{L \text{ орен}} = \frac{V_s - V_o}{L} (1-D T) \quad (3.24)$$

Для усталеного режиму вихідна напруга перетворювача описується виразом:

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (3.25)$$

Отже, вихідна потужність визначається за формулою:

$$P_o = \frac{v_o^2}{R} = V_o I_o \quad (3.26)$$

Середній струм котушки:

$$I_L = \frac{V_s}{1-D^2 R} = \frac{V_o^2}{V_s R} = \frac{V_o I_o}{V_s} \quad (3.27)$$

Максимальний і мінімальний струми котушки індуктивності визначаються за виразами:

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{1-D^2 R} + \frac{V_s D T}{2L} \quad (3.28)$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{1-D^2 R} - \frac{V_s D T}{2L} \quad (3.29)$$

Мінімальне значення індуктивності:

$$L_{\min} = \frac{D(1-D^2 R)}{2f} \quad (3.30)$$

Індуктивність L визначається наступним чином:

$$L = \frac{V_s D T}{\Delta i_L} = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (3.31)$$

3.2 Алгоритми MPRT та P&O

Для забезпечення оптимальної потужності в умовах змінної швидкості вітру швидкість генератора регулюється через управління перемикачем перетворювача. У цьому процесі використовується алгоритм MPRT

(відстеження точки максимальної потужності), який базується на методі P&O (perturb and observe) завдяки його простоті та легкості реалізації. Коефіцієнт завантаження в системі змінюється автоматично, що дозволяє створювати напругу, необхідну для досягнення максимальної потужності за поточних умов роботи генератора.

Вихідна потужність МВТ визначається за формулою:

$$P_w = V_w I_w \quad (3.35)$$

Зв'язок між величиною напруги МВТ V_w і значенням напруги ланки постійного струму V_{dc} описується наступним чином:

$$V_w = \left(\frac{1}{1-D} \right) V_{dc} \quad (3.36)$$

Вимірювання напруги та струму МВТ здійснюється відповідно до схеми, представленої на рис. 3.9, і ці параметри слугують вхідними даними для МРРТ-контролера. На основі алгоритму збурення та спостереження (P&O) ці значення обробляються для виявлення точки максимальної потужності. Контролер формує сигнал, який подається на вхід підвищувального перетворювача, забезпечуючи оптимальну робочу напругу на мікрогідроелектростанції (МГЕС) шляхом регулювання коефіцієнта перетворення енергії.

Для відстеження змін у потужності в систему навмисно додається невелике збурення. Якщо в результаті цього збурення потужність МВТ зростає, збурення продовжують у тому ж напрямку. У випадку, коли досягнуто максимуму потужності, а наступне збурення знижує її рівень, напрямок збурення змінюється на протилежний. У сталому режимі алгоритм стабілізується навколо точки максимальної потужності, забезпечуючи

ефективну роботу системи. Для зменшення амплітуди коливань потужності розмір збурень підтримується на низькому рівні.

Додатково варто зазначити, що алгоритм Р&О є одним із найпоширеніших завдяки простоті реалізації та мінімальним обчислювальним витратам. Його ефективність особливо помітна в системах із варіативними умовами, такими як сонячні або вітрові електростанції, але його застосування також успішне для МГЕС, які можуть мати змінну гідродинамічну потужність.

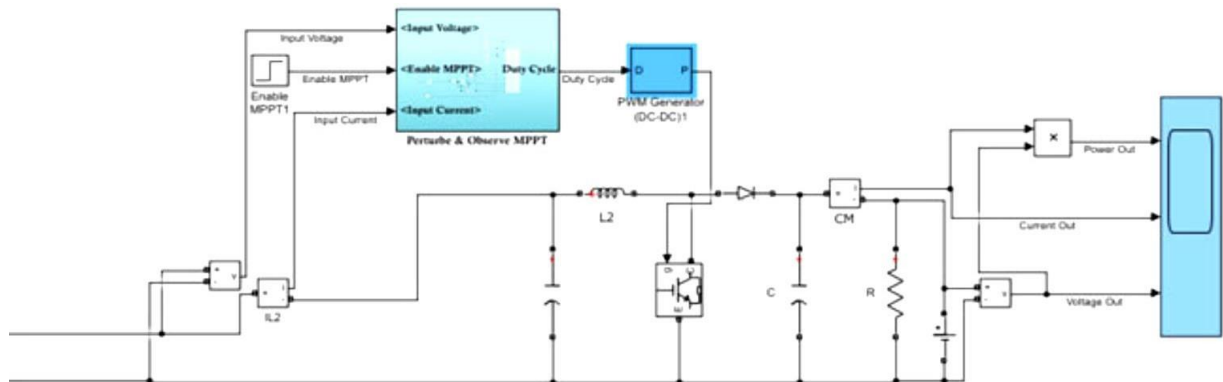


Рис. 3.9. Модель, що реалізує алгоритм Р&О

На рис. 3.10 зображено блок-схему, яка демонструє функціонування розробленого алгоритму. Робоча напруга МВТ піддається невеликому збуренню на величину dV , що викликає зміну потужності dP . У разі, якщо dP має позитивне значення, збурення напруги продовжує здійснюватися у тому ж напрямку, що й початкове збільшення. Проте, якщо dP стає від'ємним, це свідчить про віддалення робочої точки від точки максимальної потужності (МРС). У такій ситуації необхідно змінити напрямок збурення напруги на протилежний для відновлення поступового наближення до МРС.

Цей підхід базується на принципах методу збурення та спостереження (Р&О), який забезпечує ефективне відстеження точки максимальної потужності навіть за умов змінного навантаження чи зовнішніх факторів. Завдяки простоті реалізації та гнучкості алгоритм широко застосовується в енергетичних системах, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу обладнання.

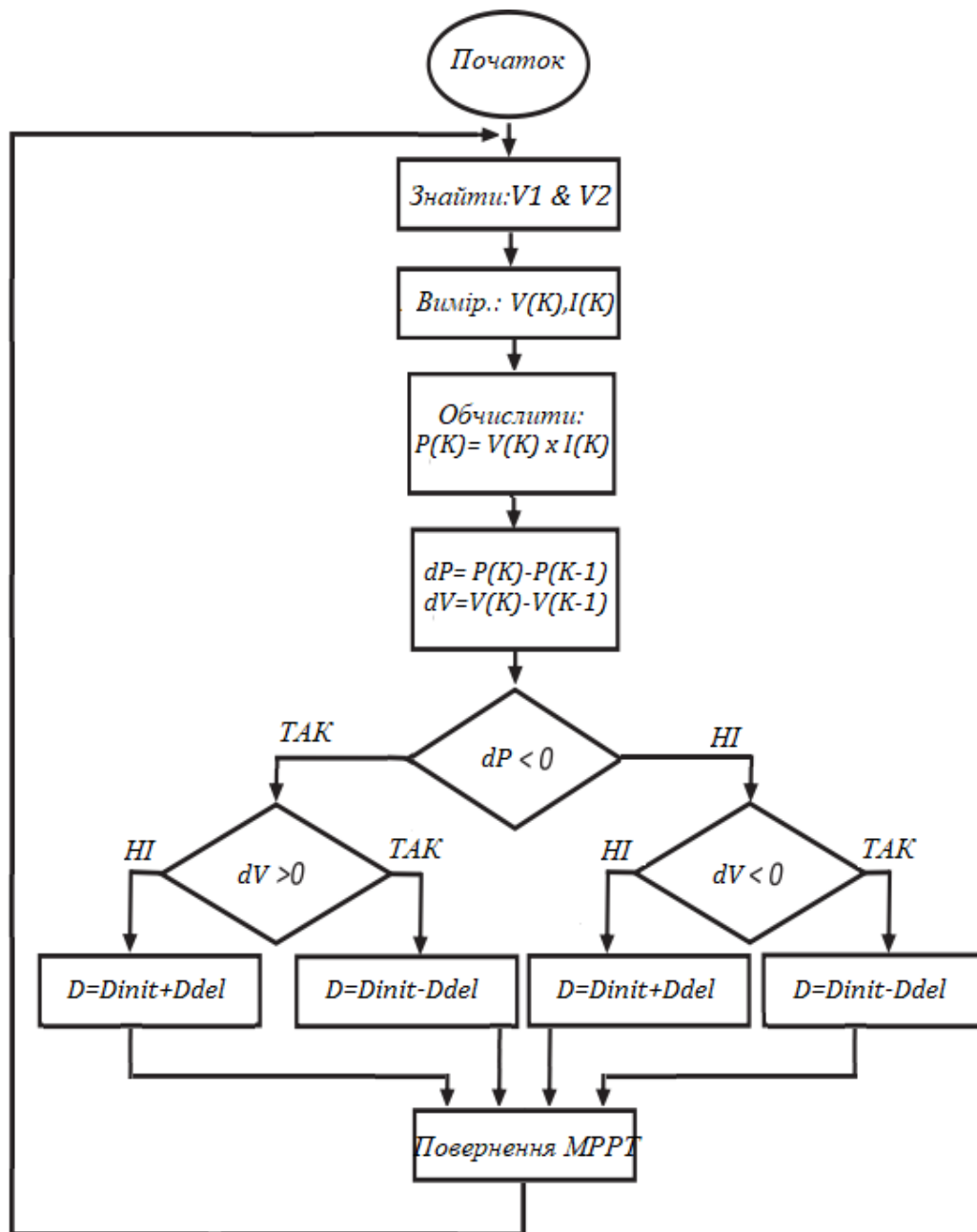


Рис. 3.10. Блок-схема алгоритму, що реалізує P&O MPPT

Регулювання ККД перетворювача можна оцінити наступним чином:

$$D = D_{init} + C_1 \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{init}} \quad (3.37)$$

З рисунку 3.11 можна побачити, що МПП досягається у випадку, коли

$$\frac{dp}{d\Omega} = 0 \quad (3.38)$$

Рівняння (3.38) після перетворень набуває вигляду:

$$\frac{dp}{d\Omega} = \frac{dp}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_{MBT}} \cdot \frac{dV_{MBT}}{d\Omega_{\epsilon}} \cdot \frac{d\Omega_{\epsilon}}{d\Omega} = 0 \quad (3.39)$$

На рис. 3.11 представлено процес досягнення максимальної потужності. Регулювання коефіцієнта завантаження здійснюється відповідно до напрямку зміни похідної dP/dD . У випадку, коли початкова точка знаходиться у високошвидкісній зоні характеристики МВТ, значення коефіцієнта завантаження збільшується. Це призводить до зниження частоти обертання ротора та зростання потужності, що дозволяє досягти точки максимальної потужності (МРР).

Аналогічно, якщо початкова точка розташована у низькошвидкісній зоні, регулювання коефіцієнта завантаження в напрямку dP/dD призводить до його зменшення. Як наслідок, частота обертання ротора МВТ поступово зростає, а система сходиться до точки МРР.

Такий підхід дозволяє ефективно балансувати між частотою обертання ротора та навантаженням, що є ключовим для забезпечення максимальної ефективності роботи гідротурбіни. Алгоритм адаптується до динамічних змін характеристик навантаження і є важливим елементом систем управління мікрогідроелектростанціями, забезпечуючи стабільне досягнення максимальної потужності навіть за умов змінних гідродинамічних параметрів.

$$V_{MBT} = 1 - D \quad V_0 \frac{dV_{MBT}}{dD} = V_0 \neq 0 \quad (3.40)$$

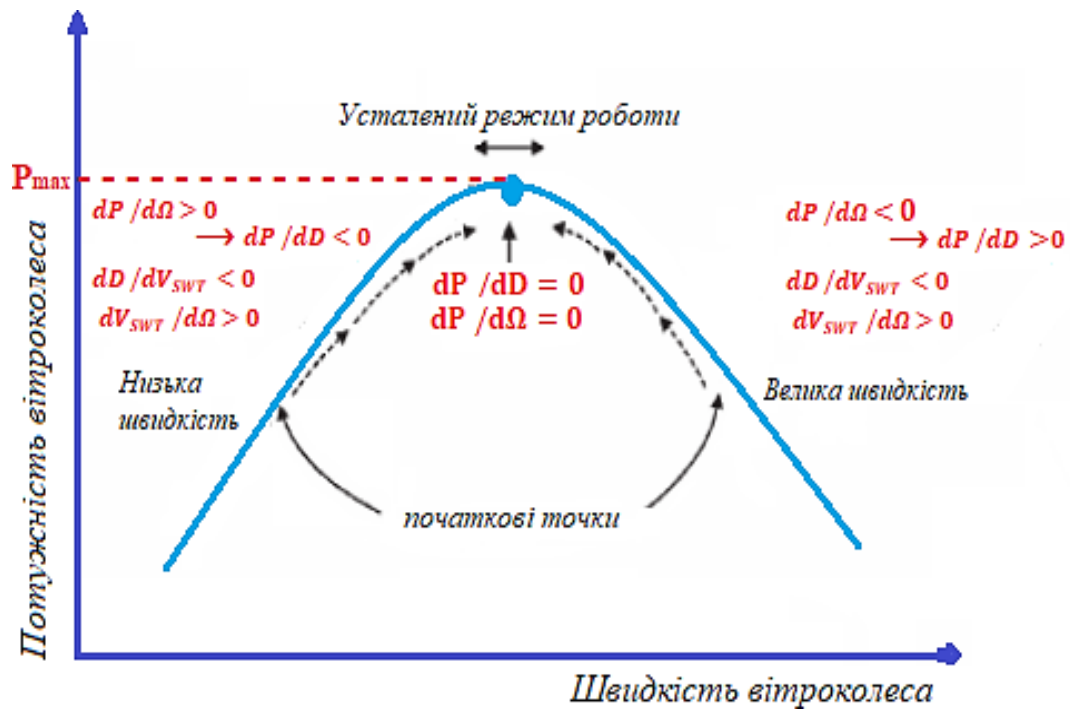


Рис. 3.11 - Схема MPPT

Як показано на рис. 3.11, алгоритм працює шляхом періодичного вимірювання напруги $V[k]$ і струму $I[k]$ через визначені інтервали часу, відомі як період MPPT. Цей період встановлює частоту, з якою алгоритм приймає рішення щодо зміни робочої точки системи. На основі вимірних параметрів визначаються потужність $P[k]$, а також зміни потужності ΔP та напруги ΔV . Розрахунок значень ΔP і ΔV здійснюється з урахуванням поточних вимірювань $V[k]$ і $I[k]$ та попередніх $V[k-1]$ і $I[k-1]$.

Далі алгоритм застосовує базову логіку для ухвалення рішень. Значення ΔP і ΔV порівнюються з нулем, щоб визначити, чи відбулися збільшення чи зменшення цих параметрів.

Слід зазначити, що зменшення розміру збурень сприяє зниженню часу реакції алгоритму та підвищує точність визначення точки максимальної напруги кола (МНК). Водночас, надмірне збільшення збурень може спричинити стаціонарні коливання навколо МНК, що негативно впливає на стабільність роботи системи.

У реальних умовах необхідно забезпечити оптимальний баланс між швидкістю відгуку алгоритму та амплітудою його коливань. Це дозволяє

підтримувати ефективну та стабільну роботу енергетичної установки, забезпечуючи максимально можливу продуктивність за динамічних змін навантаження чи зовнішніх факторів.

Багато дослідників запропонували вдосконалення алгоритму R&O для вирішення таких проблем, як тривалий час відгуку та стаціонарні коливання [3]. Основна ідея цих модифікацій полягає у використанні результуючого збурення для управління або коефіцієнтом завантаження, або опорною напругою залежно від обраної стратегії.

Узагальнюючи принцип роботи алгоритму: якщо після внесення збурення потужність збільшується, то напрямок наступного збурення залишається незмінним. Однак, якщо спостерігається зниження потужності, результуюче збурення змінюється на протилежне [23]. Такий підхід дозволяє алгоритму ефективно адаптуватися до змінних умов роботи та швидше досягати точки максимальної потужності (MPP), зменшуючи вплив коливань на стабільність системи.

Будь-яка зміна коефіцієнта завантаження впливає на вхідний опір перетворювача, що, у свою чергу, змінює робочу напругу системи. Алгоритм спостерігає за впливом таких змін на вихідну потужність, щоб визначити напрямок і величину наступного коригування. Вихідна потужність може або зростати, або зменшуватися залежно від того, чи перебуває поточний рівень робочої напруги до чи після точки коліна на графіку потужності, як зображено на рис. 3.11.

Якщо робоча напруга знаходиться за межами точки коліна (або точки максимальної потужності, MPP), збільшення напруги призведе до зменшення вихідної потужності, і навпаки. Наприклад, якщо зменшення робочого циклу викликає збільшення вхідного опору та робочої напруги, і водночас вихідна потужність зростає, це вказує на те, що поточний робочий рівень знаходиться перед MPP. У такому випадку подальше збільшення напруги призведе до зростання вихідної потужності.

На основі цього алгоритм приймає рішення про наступний робочий

цикл. Для збільшення напруги в наступному циклі алгоритм зменшує робочий цикл, сприяючи більш точному наближенню до MPP. Цей підхід забезпечує ефективне регулювання та мінімізує втрати енергії, дозволяючи системі адаптуватися до динамічних змін у характеристиках навантаження чи джерела живлення.

3.3 Загальний опис комп'ютерної моделі мережі з ВЕУ

На рис. 3.12 наведено схему мікроенергетичної системи постійного струму, побудованої на основі малої вітрової турбіни (МВТ), що розглядається в рамках цього дослідження.

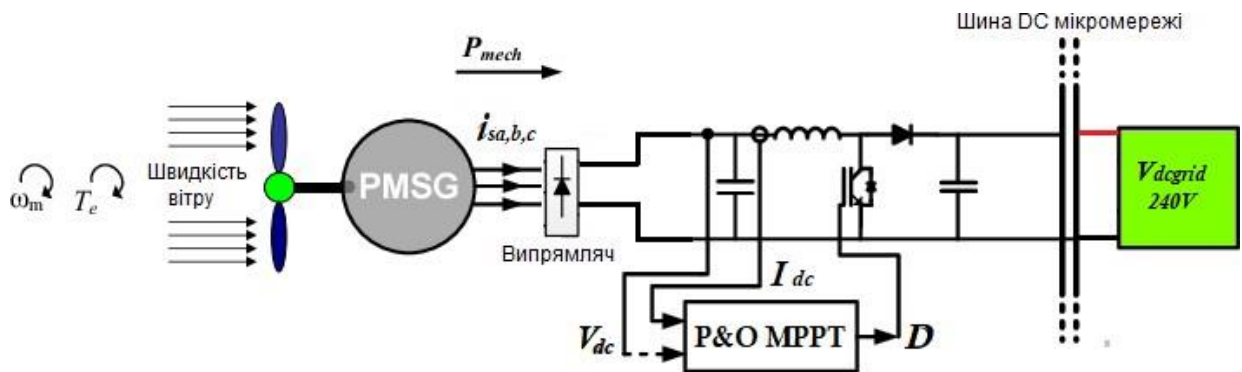


Рис. 3.12. Комп'ютерна модель МВТ з СГПМ

Система складається з вітроенергетичної установки (ВЕУ) на базі синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ), трифазного діодного випрямляча, контролера P&O MPPT, підвищувального перетворювача постійного струму та навантаження постійного струму. Технічні характеристики мікромережі постійного струму МВТ представлені в таблицях 3.3 і 3.4.

Система спроектована для роботи в умовах змінних швидкостей вітру. Через це напруга та струм, що генеруються вітрогенератором, мають змінні параметри. Ці змінні величини подаються на вхід трифазного діодного випрямляча, який перетворює змінну напругу, отриману від МВТ, у постійну.

Після етапу випрямлення підвищувальний перетворювач постійного

струму підвищує напругу до регульованого рівня, що є придатним для живлення навантаження постійного струму. Така конфігурація забезпечує ефективне використання енергії вітру та стабільну роботу мікроенергетичної системи, навіть за умов мінливих зовнішніх факторів, таких як швидкість вітру.

Напруга та струм, зчитані з вхідних клем підвищувального перетворювача, слугують вхідними даними для контролера P&O MPPT. Ці параметри постійно використовуються для розрахунку коефіцієнта завантаження, який визначає роботу підвищувального перетворювача.

Контролер P&O MPPT забезпечує динамічну оцінку коефіцієнта завантаження, який подається на підвищувальний перетворювач для регулювання рівня напруги. Завдяки цьому перетворювач постійно коригує свою роботу, забезпечуючи відстеження точки максимальної потужності (MPP) незалежно від змінних умов, таких як швидкість вітру чи рівень генерованої напруги.

Вихідна напруга підвищувального перетворювача подається на резистивне навантаження, яке функціонує як споживач енергії в мікромережі постійного струму. Така конфігурація дозволяє ефективно передавати енергію до навантаження, забезпечуючи стабільність та оптимальне використання ресурсів системи.

Модель вітрової турбіни була розроблена на основі математичних рівнянь, викладених у попередніх розділах. Кількість енергії, яку може отримати мала вітрова турбіна, залежить від її конструктивних особливостей та умов експлуатації.

Ключовими факторами, що впливають на потужність, є діаметр ротора, швидкість вітру, а також коефіцієнт потужності, який визначає ефективність перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію. Збільшення діаметра ротора дозволяє захоплювати більший об'єм повітря, що підвищує загальну потужність турбіни. Водночас, швидкість вітру є основним параметром, оскільки потужність, яку можна отримати, пропорційна кубу

швидкості вітру.

Окрім цих факторів, на ефективність роботи турбіни впливають аеродинамічні характеристики лопатей, конструкція генератора, а також умови навколишнього середовища, включно з щільністю повітря. Усі ці параметри враховуються в моделюванні, щоб забезпечити точну оцінку продуктивності турбіни за різних умов.

Енергетичний комплекс містить кілька ключових компонентів: генератор синхронного типу, оснащений постійними магнітами, випрямляч без системи керування на три фази, а також DC-DC конвертер (схематично зображені на ілюстраціях 3.7 та 3.8). Розрахункові характеристики для моделювання підвищувального DC-DC перетворювача та накопичувального конденсатора були визначені шляхом застосування відповідних математичних залежностей, детально описаних у попередніх частинах роботи. При цьому всі обчислені параметри враховують номінальні показники потужності перетворювального пристрою, характеристики вітрової турбіни та допустимі межі коливань напруги.

Додаткова інформація:

- DC-DC перетворювачі зазвичай працюють на частотах від 20 кГц до 2 МГц;
- використання постійних магнітів у генераторі забезпечує вищий ККД порівняно з електромагнітним збудженням;
- некерований трифазний випрямляч складається з шести діодів, з'єднаних за мостовою схемою;
- конденсатор у ланці постійного струму виконує функцію фільтрації пульсацій та накопичення енергії;
- сучасні силові напівпровідникові прилади (IGBT, MOSFET) дозволяють створювати високоефективні перетворювачі з ККД понад 95%.

Система регулювання DC-DC конвертера реалізує метод оптимізації "Perturb & Observe" (P&O), який аналізує ефективність перетворення енергії. Даний алгоритм підтримує стабільний рівень напруги у 240 В при роботі з

номінальним навантаженням 3 кВт. Імплементована в середовищі Matlab/Simulink віртуальна модель системи Maximum Power Point Tracking (MPPT), візуалізована на рисунку 3.13, функціонує за принципами, що відображені у блок-схемі на рисунку 3.10.

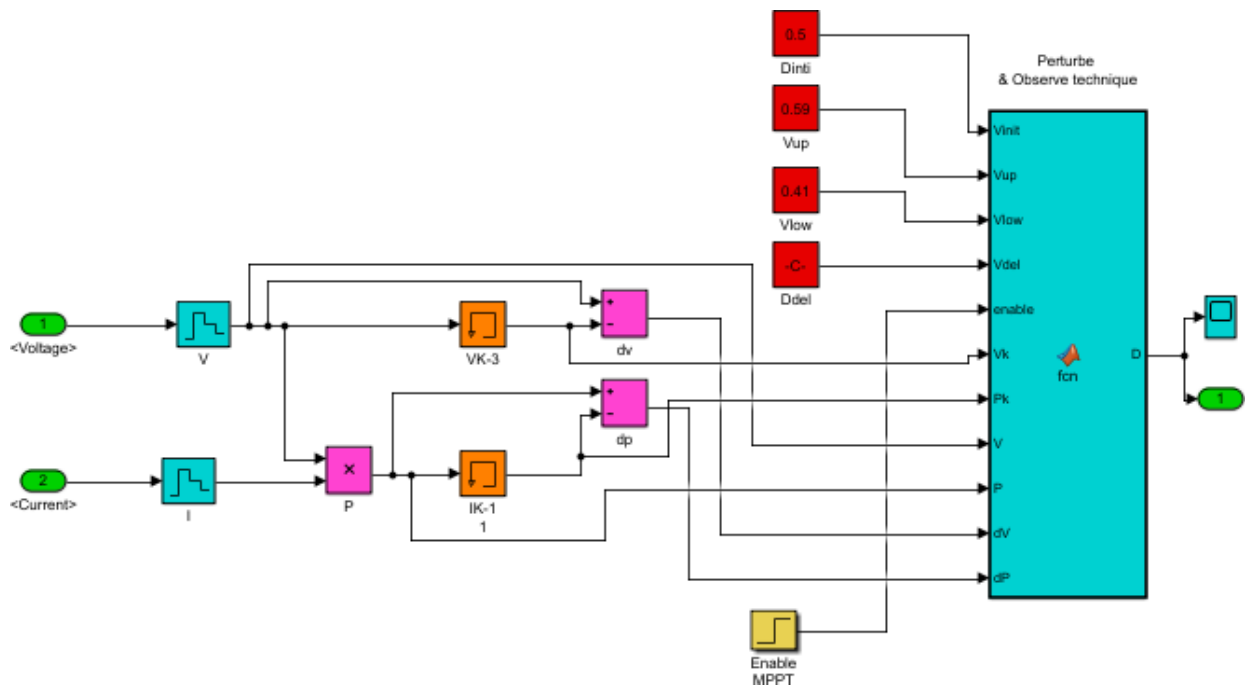


Рис. 3.10. Simulink-Модель керування MPPT з допомогою алгоритму P&O

3.4 Результати комп'ютерного моделювання мережі ВЕУ

Комп'ютерне моделювання системи, схематично представленої на рис.3.12, проводилось у програмному комплексі MATLAB/Simulink з використанням вхідних даних із Таблиць 3.3 та 3.4. Метою симуляції було дослідження характеристик DC мікромережі вітрової турбіни та верифікація ефективності розробленого алгоритму контролю. Комплексний аналіз отриманих результатів охоплює три ключові аспекти функціонування системи: експлуатаційні показники вітроенергетичної установки, характеристики електричного комплексу та оцінку роботи системи

автоматичного керування.

Комп'ютерна симуляція проводиться за умов змінного вітрового потоку, при цьому контролер забезпечує стабілізацію вихідної напруги DC-DC перетворювача на максимально можливому рівні для кожного значення швидкості вітру. Такий підхід дозволяє оцінити якість роботи впровадженого алгоритму відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Графік на рис. 3.14 демонструє часову динаміку швидкості вітру, яка змінюється ступінчасто: спочатку має значення 5 м/с, далі зростає до 7 м/с, після короткого інтервалу підвищується до 11 м/с, і досягає фінального значення 12 м/с.

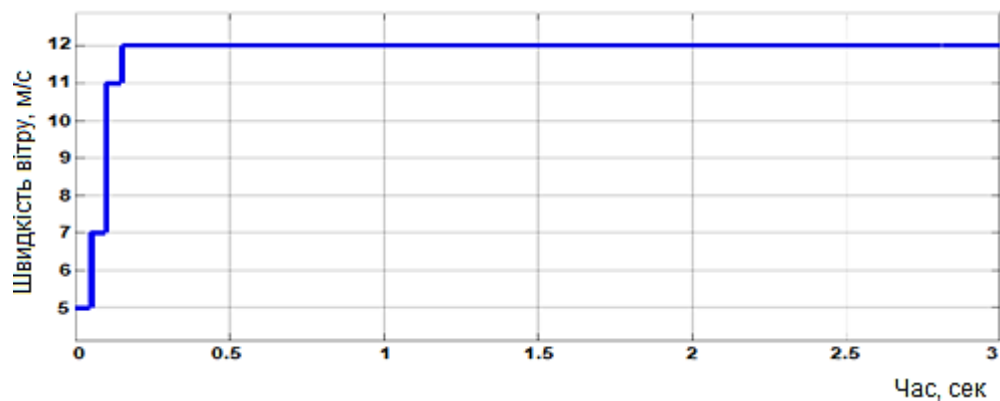


Рис. 3.14. Графік зміни швидкості вітру

Система автоматично налаштовує частоту обертання ротора вітроустановки для досягнення максимальної генерації при кожному значенні швидкості вітру. При максимальній швидкості 12 м/с енергоустановка виходить на проектну потужність 3 кВт, тоді як при нижчих швидкостях виробляється пропорційно менша потужність. Механічні характеристики турбіни відповідають розрахунковій кривій оптимальної потужності з незначними відхиленнями під час перехідних процесів зміни швидкості вітру. Завдяки ефективному алгоритму керування генераторний комплекс забезпечує максимальне енергетичне перетворення при варіації швидкості вітрового потоку. Тривалість симуляції становить 3 секунди, при цьому динамічна зміна швидкості від 5 до 12 м/с реалізується з дискретністю 0,05 с,

після чого параметри стабілізуються.

Динаміка енергетичних показників системи демонструє пряму залежність від швидкості вітрового потоку: при зростанні швидкості вітру підвищується генерована потужність, що відображається на вихідних параметрах інвертора (амплітуда струму та напруги). За початкової швидкості вітру 5 м/с вітроустановка генерує приблизно 860 Вт, які спочатку перетворюються випрямним модулем у постійний струм. Встановлений між випрямлячем та навантаженням DC-DC конвертер підвищувального типу, керований алгоритмом MPPT, забезпечує оптимізацію рівня напруги для максимізації відбору потужності.

При досягненні вітровим потоком швидкості 7 м/с енергетична установка забезпечує генерацію 1,4 кВт, створюючи на виході змінну напругу близько 80 В. Силовий тракт, що включає випрямляч та DC-DC конвертер з MPPT-керуванням, перетворює цю напругу до оптимального рівня постійного струму. Подальше збільшення швидкості вітру до 11 м/с призводить до зростання вихідної потужності до 1,74 кВт при напрузі 99,5 В, яка також проходить двоступеневе перетворення для узгодження з навантаженням. При досягненні розрахункової швидкості 12 м/с система виходить на номінальний режим: генерується 3 кВт при первинній напрузі 114 В змінного струму, яка після випрямлення підвищується перетворювачем до стабільних 240 В постійного струму.

Графічна залежність на рис. 3.15 відображає часову характеристику кута тангажу вітроенергетичної установки. Відповідно до параметрів, наведених у Таблиці 3.3, для даної малопотужної турбіни встановлено фіксований нульовий кут атаки лопатей, що є типовим технічним рішенням для вітрогенераторів малої потужності. Діаграма підтверджує, що протягом всього періоду моделювання кут тангажу залишається незмінним на нульовій позначці.

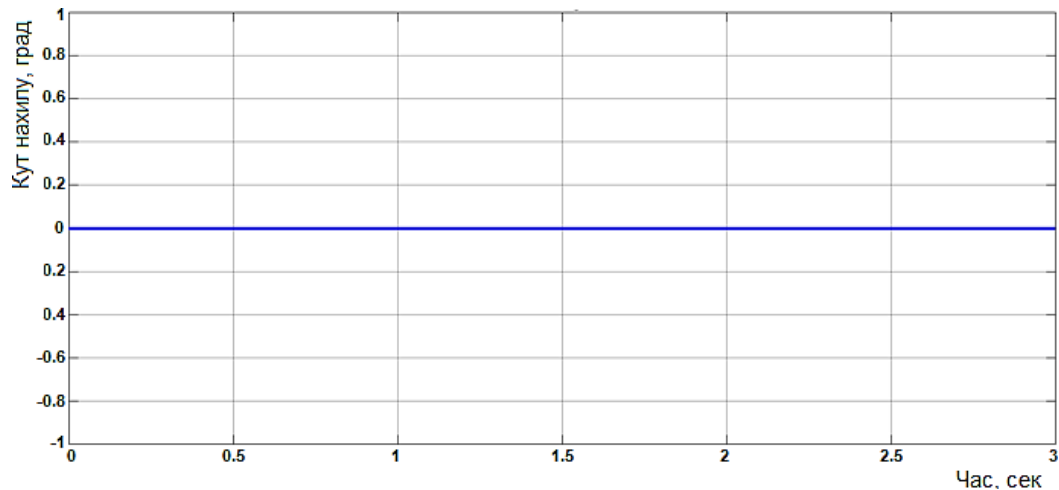


Рис. 3.15. Графік зміни кута нахилу

Динаміка вихідної напруги на терміналах магнітно-вентильного трансформатора (МВТ), представлена графічно, характеризується двома видами відхилень від усталеного режиму. Нижнє відхилення складає 2% від номінального значення, тоді як верхнє перевищення стаціонарного рівня досягає 0,456%. Часова характеристика сигналу демонструє поступове зростання протягом 146,362 мілісекунд.

Аналізуючи динамічний процес детальніше, можна виділити кілька ключових етапів: спочатку відбувається швидкий підйом до рівня 40,5 В протягом перших 39 мілісекунд роботи. Наступна фаза характеризується стрибком до 56,55 В на позначці 53 мілісекунди від початку процесу. Завершальний етап стабілізації завершується досягненням номінального значення 114 В через 0,4 секунди від моменту запуску.

Важливо зазначити, що такі перехідні процеси типові для силових трансформаторів і пов'язані з електромагнітними явищами в магнітопроводі та обмотках. Наявність незначного перерегулювання свідчить про достатньо якісне налаштування системи керування та належний вибір параметрів магнітної системи трансформатора. Час наростання у 146,362 мс є прийнятним для більшості промислових застосувань такого обладнання.

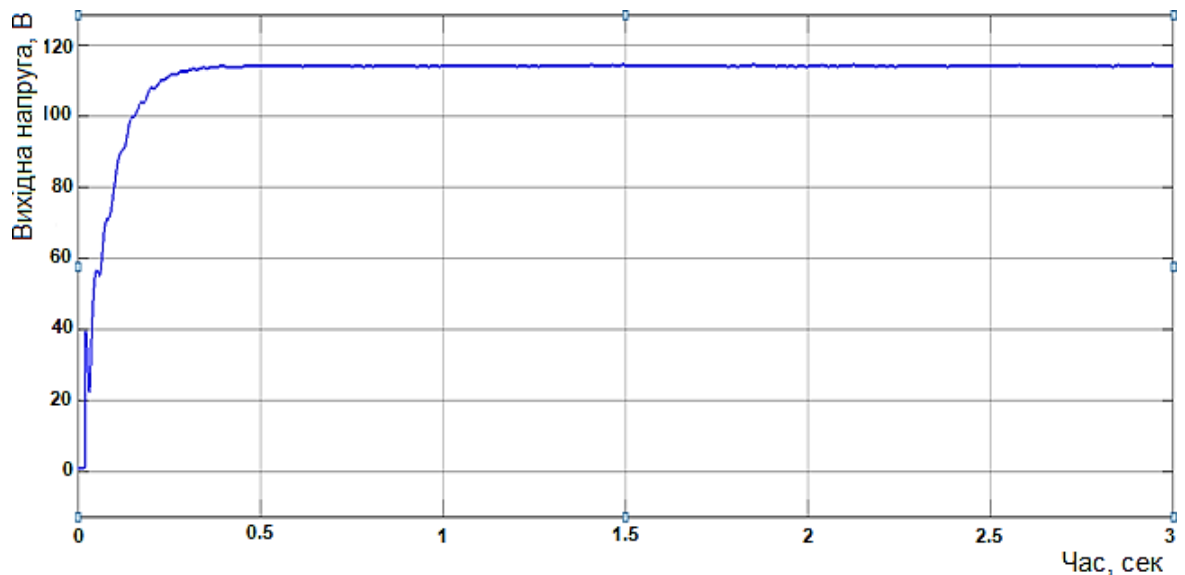


Рис. 3.16. Графік зміни напруги МВТ

Графічне представлення динаміки обертального руху ротора демонструє комплексну залежність від змін швидкості вітрового потоку. Характерними особливостями перехідного процесу є наявність перерегулювання величиною 1,581% та проскакування зі значенням 0,862%. Динамічна характеристика системи відзначається часом наростання 99,98 мілісекунд.

Аналіз часової залежності швидкості обертання виявляє чотири характерні етапи, що корелюють зі змінами вітрового потоку:

На початковому інтервалі (0-0,05 с) при швидкості вітру 5 м/с ротор досягає кутової швидкості 131,8 рад/с. Наступний період (0,05-0,1 с) характеризується підвищенням швидкості вітру до 7 м/с, що спричиняє зростання обертів до 185,6 рад/с. У третьому часовому проміжку (0,1-0,15 с) відбувається суттєве збільшення швидкості вітру до 11 м/с, внаслідок чого кутова швидкість ротора сягає 293,2 рад/с. Завершальна фаза починається з позначки 0,2 с, коли при максимальній швидкості вітру 12 м/с система виходить на усталений режим з кутовою швидкістю 320 рад/с.

Варто зазначити, що такий характер зміни швидкості є типовим для вітрогенераторних установок. Відносно невеликі значення перерегулювання та проскакування свідчать про оптимальне налаштування системи керування та належний підбір параметрів ротора. Спостерігається майже лінійна

залежність між швидкістю вітру та кутовою швидкістю ротора, що вказує на ефективну аеродинамічну конструкцію лопатей та якісну роботу системи регулювання швидкості обертання.

На графічному зображенні представлена міжфазна напруга на вихідних терміналах магнітно-вентильного трансформатора (МВТ). Система досягає стабільного робочого режиму через 0,25 секунди від початку роботи, при цьому усталене значення напруги складає приблизно 120 В змінного струму. Цей електричний сигнал подається на вхід випрямляча для подальшого перетворення.

Важливо зауважити, що значення напруги 120 В є ефективним (діючим) значенням, тоді як амплітудне значення становить близько 170 В ($120 \cdot \sqrt{2}$). Така напруга є типовою для низьковольтних систем електропостачання та забезпечує оптимальні умови для подальшого випрямлення і стабілізації. Використання МВТ дозволяє отримати високоякісний синусоїдальний сигнал з мінімальними спотвореннями, що є критично важливим для ефективної роботи випрямляча та зменшення пульсацій у вихідній напрузі.

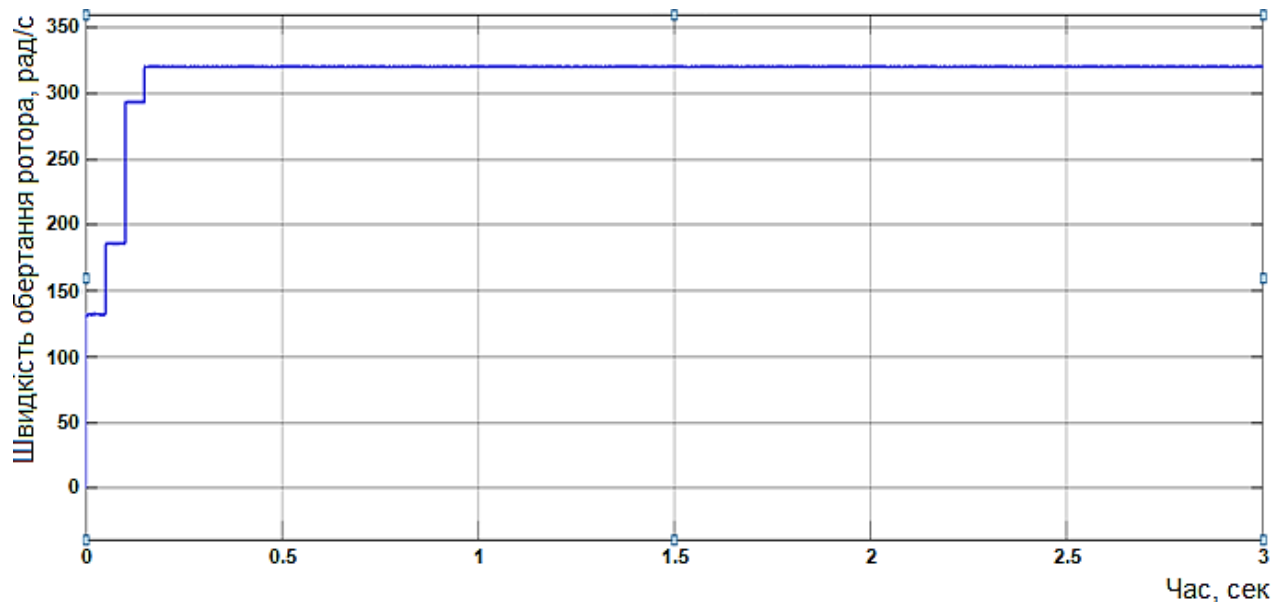


Рис. 3.17. Графік зміни швидкості обертання ротора МВТ

Стабілізація напруги за 0,25 секунди свідчить про хороші динамічні характеристики трансформатора та правильний вибір параметрів його магнітної системи. Такий час встановлення є прийнятним для більшості промислових застосувань та забезпечує надійну роботу подальших каскадів перетворення енергії.

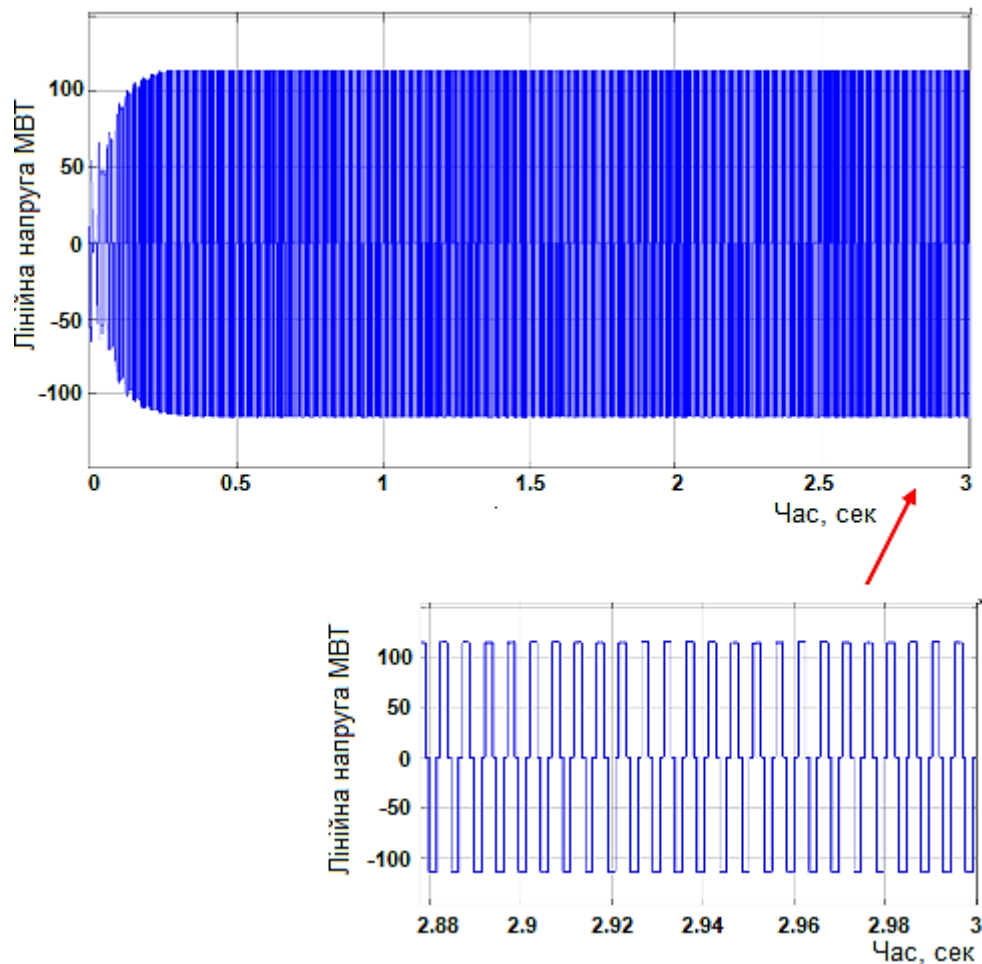


Рис. 3.18. Графік зміни лінійної напруги МВТ

Аналіз динаміки струму статора синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) демонструє нестабільний характер до 0,15 секунди від початку спостереження. Після проходження перехідного процесу, що характеризується перерегулюванням у 0,995%, система виходить на стаціонарний режим із значенням струму близько 25 ампер.

Особливий інтерес представляє залежність струму статора від інтенсивності вітрового потоку. При мінімальній розглянутій швидкості вітру

5 м/с генератор продукує струм приблизно 15 ампер. Збільшення швидкості вітру до 11 м/с призводить до значного зростання струму статора, який досягає рівня 29,9 ампер.

Варто відзначити, що відносно невелике значення перерегулювання (менше 1%) свідчить про оптимальне налаштування системи керування генератором. Спостерігається майже лінійна залежність між швидкістю вітру та генерованим струмом, що є характерним для СГПМ та вказує на ефективну роботу всієї електромеханічної системи. Такі характеристики забезпечують стабільну генерацію електричної енергії при змінних вітрових умовах, що є критично важливим для надійної роботи вітроенергетичних установок.

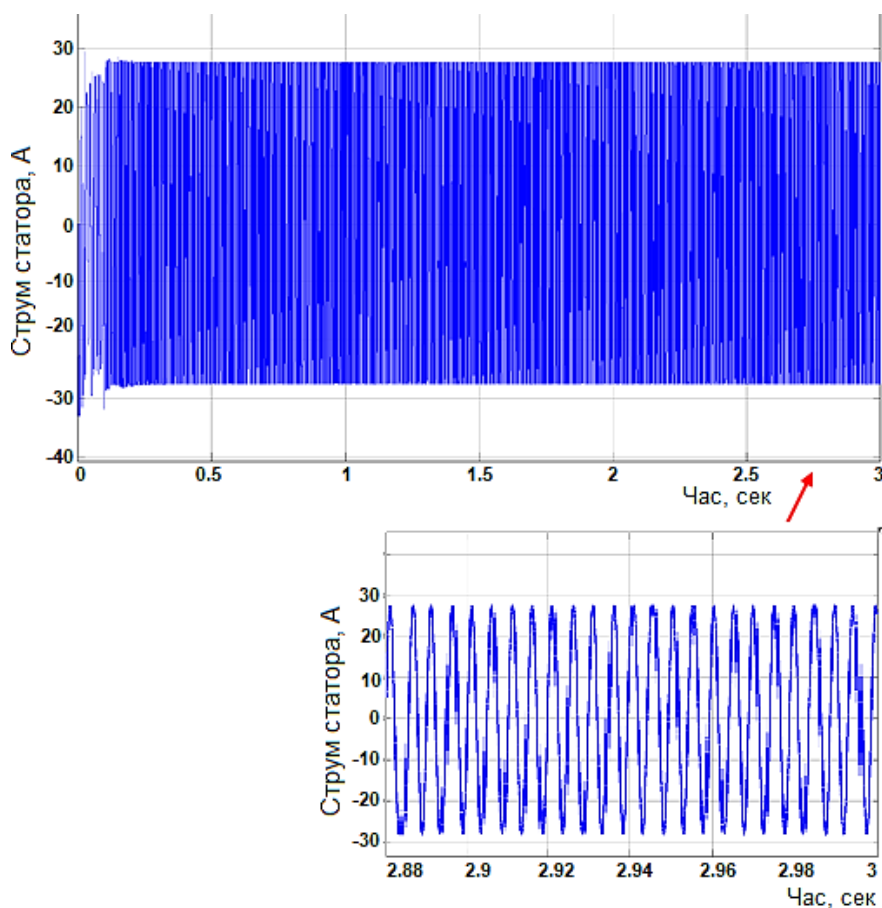


Рис. 3.19. Графік струму статора СГПМ

Система силової електроніки отримує живлення від трифазного повномостового діодного випрямляча, який забезпечує постійну напругу 120 В при потужності 3 кВт. Ця енергія спрямовується на вхід підвищувального DC-DC перетворювача для подальшого перетворення.

Аналіз часових характеристик струму в індуктивності перетворювача виявляє два характерні режими роботи. У перехідному режимі, який триває до моменту досягнення вітровим потоком швидкості 7 м/с, спостерігаються значні флуктуації струму з піковим значенням 35,29 ампер. Після завершення перехідного процесу система стабілізується на рівні 25 ампер.

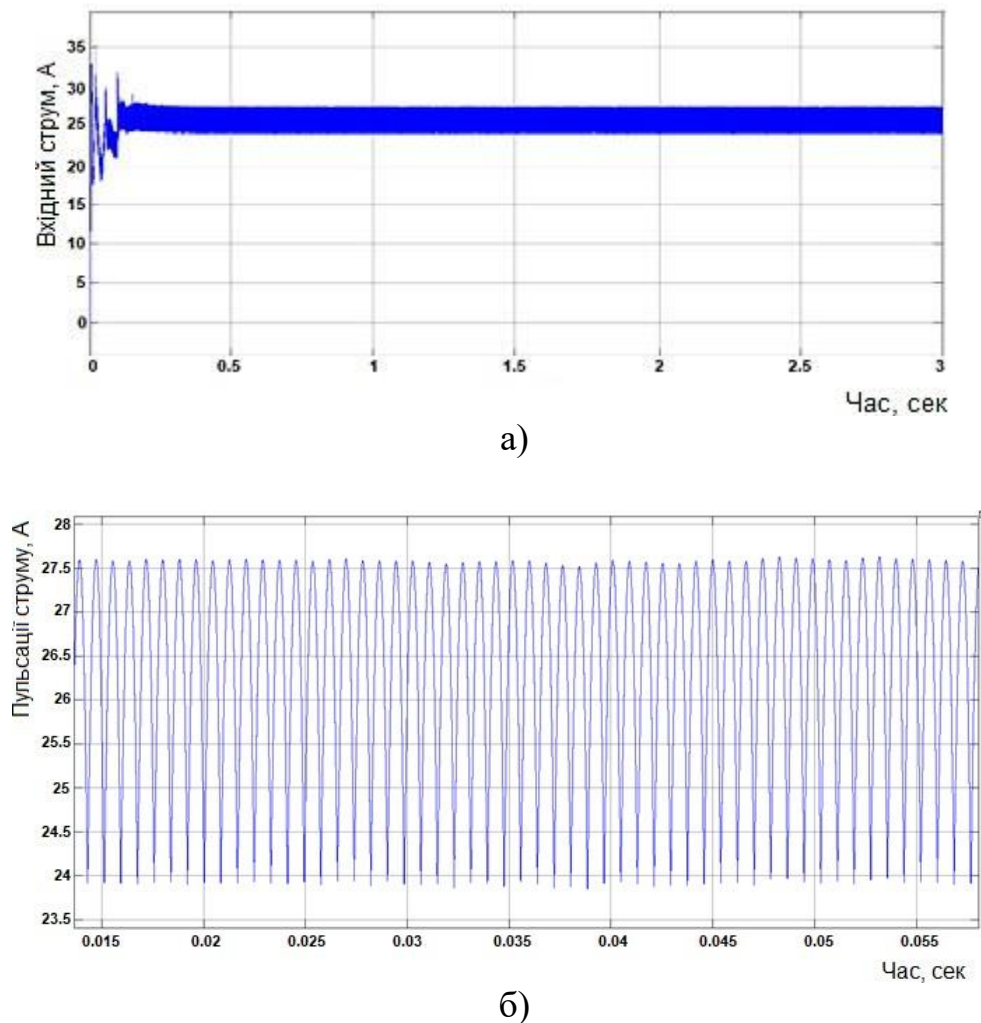


Рис. 3.20. Графік струму індуктивності підвищувального перетворювача (а); графік пульсацій струму (б)

Дослідження пульсаційної складової струму індуктивності демонструє значно кращу стабільність - амплітуда коливань обмежується діапазоном від 24 до 27 ампер. Такий рівень пульсацій (близько $\pm 6\%$ від номінального значення) є прийнятним для більшості промислових застосувань та свідчить про коректний вибір параметрів фільтруючих елементів перетворювача.

Варто зазначити, що наявність незначних пульсацій струму є типовою

характеристикою імпульсних перетворювачів постійної напруги та пов'язана з їхнім принципом роботи, заснованим на широтно-імпульсній модуляції. Отримані результати вказують на ефективну роботу системи керування та оптимальний вибір параметрів силових компонентів перетворювача.

Графічне представлення вихідної напруги трифазного повномостового діодного випрямляча виявляє комплексний характер перехідного процесу. Система досягає усталеного значення 114 В після проходження декількох характерних етапів. Перехідний процес характеризується двома ключовими показниками: перерегулюванням у 0,347% та нестабільністю, що сягає 2,633%.

Особливу увагу привертає інтервал від початку роботи до 0,4 секунди, протягом якого спостерігаються суттєві флуктуації напруги. Загальна тривалість перехідного процесу складає приблизно 0,6 секунди, після чого система виходить на стабільний режим роботи.

Варто зазначити, що наявність коливань у початковий період є типовим явищем для потужних випрямних систем та пов'язана з перехідними процесами в силових компонентах та фільтруючих елементах. Відносно невелике значення перерегулювання (менше 0,5%) свідчить про оптимальне налаштування системи керування, тоді як показник нестабільності (2,633%) вказує на необхідність можливої оптимізації фільтруючих кіл для зменшення пульсацій вихідної напруги.

Час встановлення 0,6 секунди є прийнятним для більшості промислових застосувань такого класу випрямних систем, хоча за необхідності його можна оптимізувати шляхом корекції параметрів згладжувальних фільтрів та системи керування.

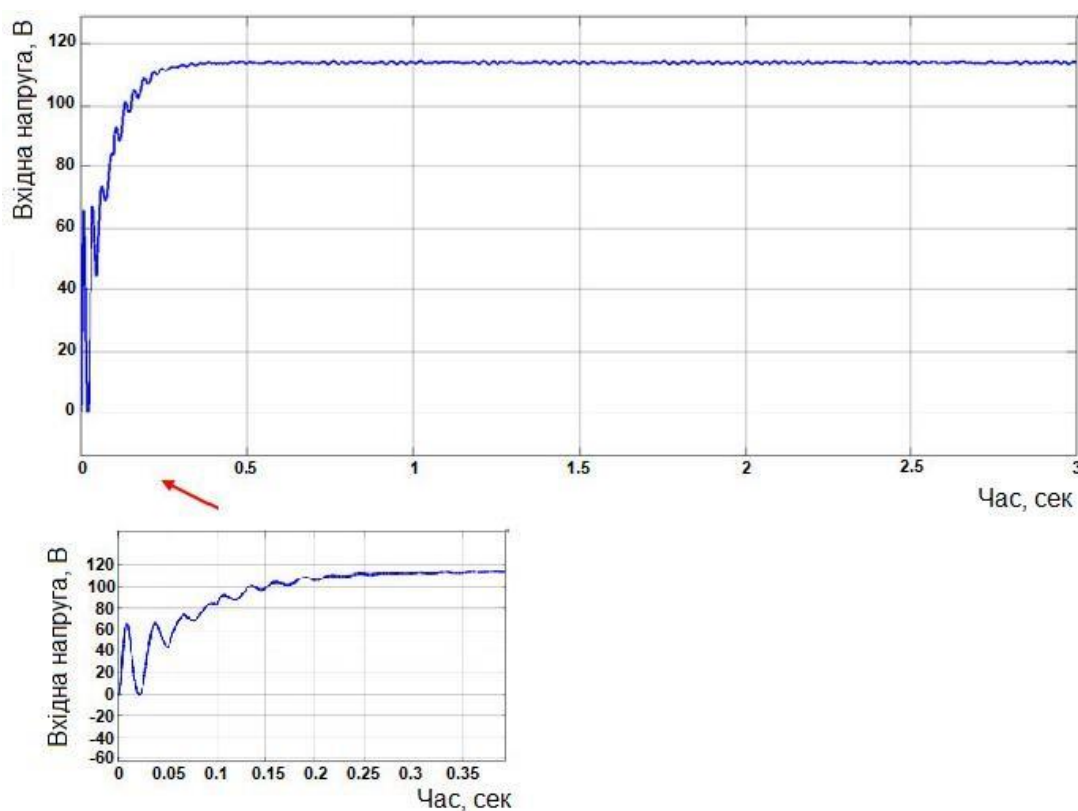


Рис. 3.21. Графік вхідної напруги підвищувального перетворювача

Представлений графік демонструє динаміку зміни коефіцієнта завантаження (duty cycle), який генерується контролером пошуку точки максимальної потужності (MPPT), що базується на алгоритмі збурення та спостереження (Perturb and Observe). Цей параметр визначає співвідношення між періодами відкритого та закритого стану силового ключа підвищувального перетворювача.

Алгоритм Perturb and Observe працює за принципом послідовних ітерацій, періодично змінюючи робочу точку системи та оцінюючи її вплив на вихідну потужність. Коефіцієнт завантаження динамічно коригується для забезпечення роботи вітрогенератора в точці максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP).

Важливо зазначити, що такий метод керування дозволяє системі автоматично адаптуватися до змін швидкості вітру та інших зовнішніх факторів. Правильний підбір параметрів алгоритму MPPT є критичним для забезпечення оптимальної ефективності перетворення енергії вітру в

електричну енергію. При цьому частота комутації силового ключа та величина кроку зміни коефіцієнта завантаження повинні бути ретельно узгоджені з динамічними характеристиками механічної та електричної частин системи.

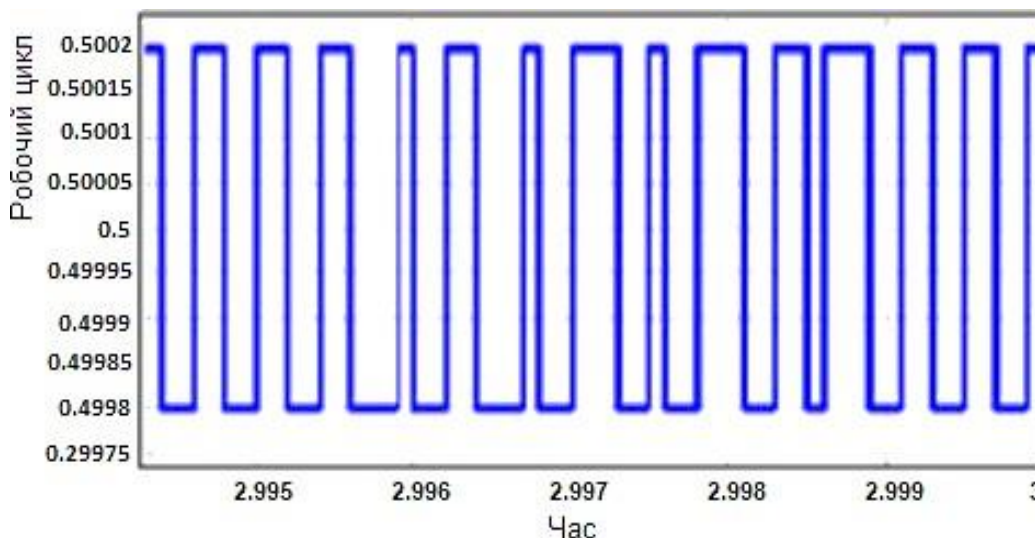


Рис. 3.22. Робочий цикл із застосуванням алгоритму P&O MPRT

Аналіз роботи контролера MPRT демонструє високоточне регулювання коефіцієнта завантаження, який варіюється в надзвичайно вузькому діапазоні від 0,4998 до 0,5002. Така прецизійна підтримка робочої точки свідчить про ефективність обраного алгоритму керування.

Часова характеристика вихідного струму підвищувального перетворювача відображає складну динаміку, що корелює зі змінами швидкості вітрового потоку. Перехідний процес характеризується перерегулюванням 0,774% та від'ємним викидом 2,131%, при цьому час наростання складає 126,918 мілісекунд.

Процес зміни струму можна розділити на чотири характерні етапи:

- при початковій швидкості вітру 5 м/с (0-0,05 с) струм стабілізується на рівні 4,26 А;
- зростання швидкості до 7 м/с (0,1-0,15 с) призводить до підвищення струму до 8,88 А;
- подальше збільшення швидкості до 11 м/с (0,15-0,2 с) спричиняє зростання струму до 11 А;

- остаточна стабілізація на рівні 12,5 А відбувається при швидкості вітру 12 м/с через 0,4 с від початку процесу.

Варто відзначити, що спостерігається майже лінійна залежність між швидкістю вітру та вихідним струмом перетворювача, що свідчить про ефективну роботу системи керування та оптимальний вибір параметрів силової частини. Відносно невеликі значення перерегулювання та часу наростання вказують на хороші динамічні характеристики системи в цілому.

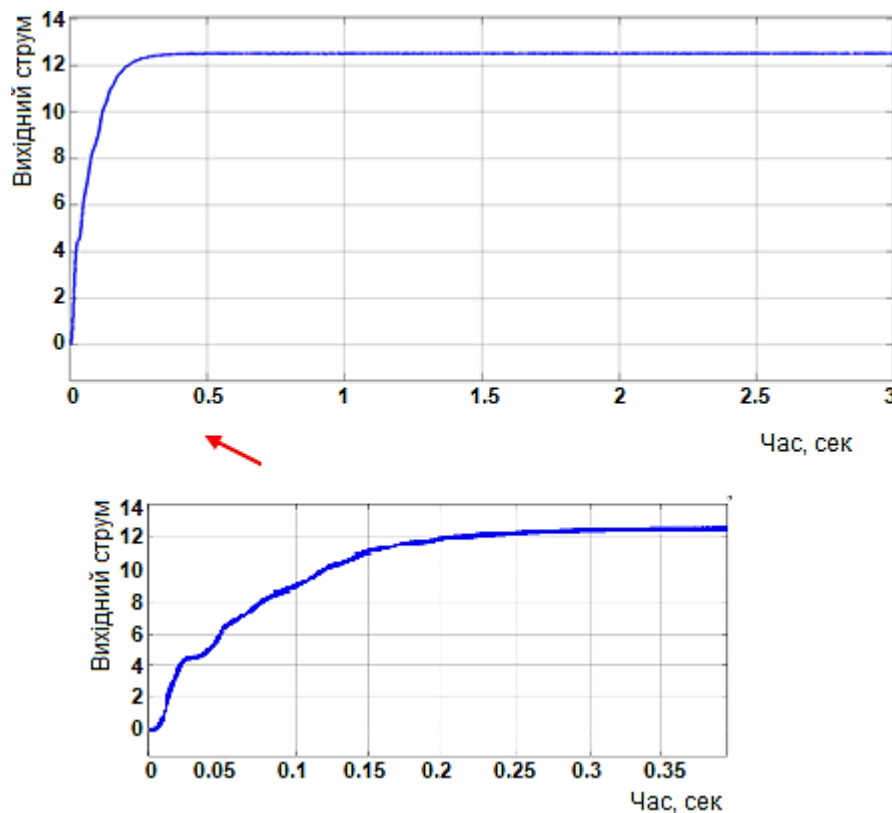


Рис. 3.23. Графік вихідного струму підвищувального перетворювача

Динаміка вихідної напруги підвищувального конвертера, представлена на графіку 3.24, демонструє поступове зростання з тривалістю перехідного процесу 138,532 мс. За умови коефіцієнта заповнення 0,5 та швидкості повітряного потоку 12 м/с, система стабілізується на рівні 240 В через 0,4 секунди.

Процес зміни напруги можна розділити на кілька етапів: початковий рівень складає 81,78 В при швидкості вітрового потоку 5 м/с (інтервал від 0 до

0,05 с). При посиленні вітру до 7 м/с в проміжку між 0,1 та 0,15 с спостерігається підйом напруги до позначки 117,5 В. Подальше збільшення швидкості вітру до 11 м/с (часовий відрізок 0,15-0,2 с) призводить до зростання напруги до 211,5 В, після чого система поступово виходить на номінальний режим роботи з напругою 240 В.

Варто зазначити, що така динаміка є типовою для вітроенергетичних установок з підвищувальними перетворювачами. Швидкість наростання напруги залежить від інерційності механічної частини вітрогенератора та параметрів електронного перетворювача. Коефіцієнт завантаження 0,5 є оптимальним для забезпечення високої ефективності перетворення енергії вітру в електричну енергію при заданих умовах роботи.

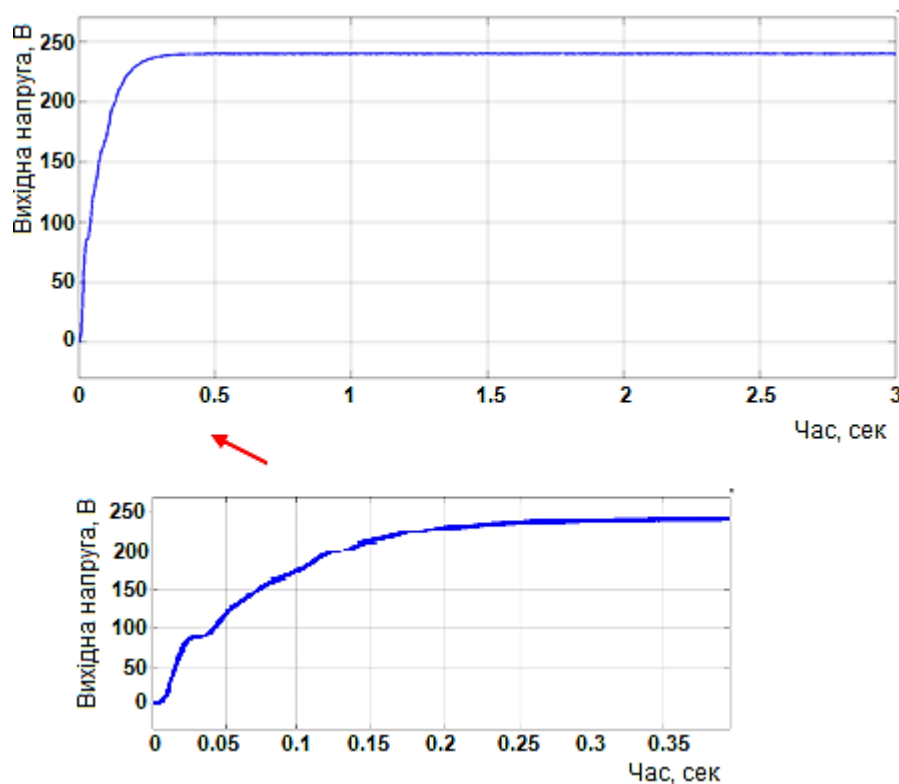


Рис. 3.24. Графік вихідної напруги підвищувального перетворювача

Характеристика вихідної потужності підвищувального конвертера, відображена графічно на рисунку 3.25, демонструє особливі показники якості перехідного процесу: перерегулювання складає 0,433%, нестабільність досягає 2,173%, а тривалість фронту наростання становить 174,712 мс. При

швидкості вітрового потоку 12 м/с система виходить на номінальний режим роботи з потужністю 3 кВт за 0,4 секунди.

Динаміка зміни потужності відбувається поетапно: на початковому інтервалі (0-0,05 с) при швидкості вітру 5 м/с генерується 718,5 Вт. Зі збільшенням швидкості повітряного потоку до 7 м/с у проміжку часу 0,1-0,15 с відбувається зростання потужності до 1514 Вт. Наступне посилення вітру до 11 м/с (діапазон 0,15-0,2 с) забезпечує підвищення вихідної потужності до 2330 Вт, після чого система поступово досягає номінального значення 3 кВт.

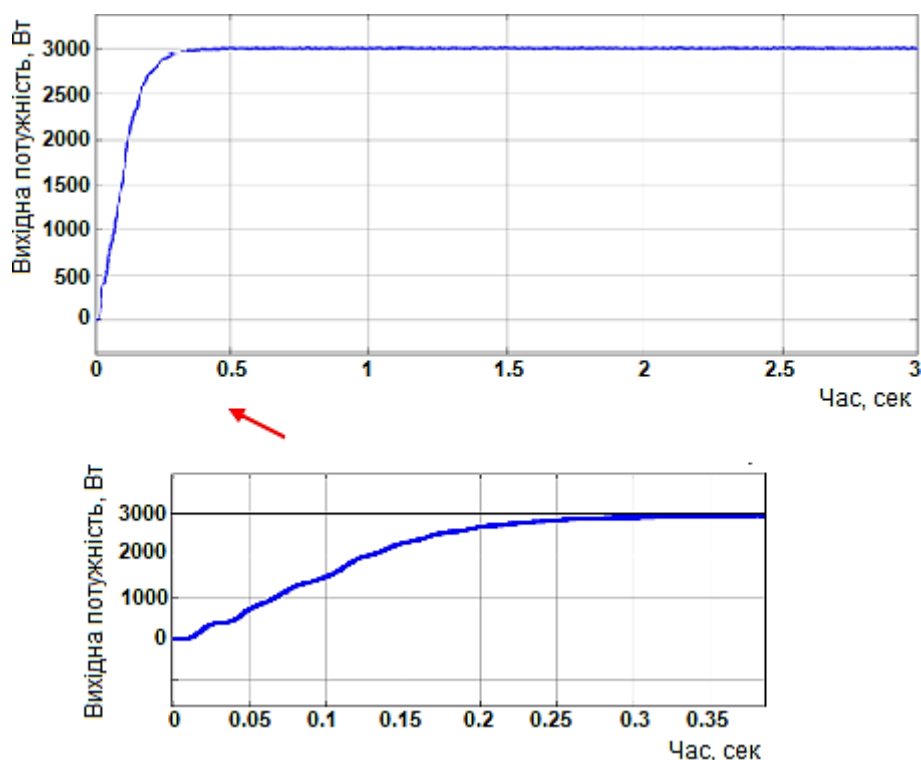


Рис. 3.25. Графік зміни вихідної потужності підвищувального перетворювача використанням Р&О МРРТ

Важливо відзначити, що наявність невеликого перерегулювання (0,433%) свідчить про оптимальне налаштування системи керування перетворювачем. Показник нестабільності 2,173% є прийнятним для вітроенергетичних установок такого класу, враховуючи природну мінливість вітрового потоку. Час наростання 174,712 мс відображає швидкодію системи та її здатність ефективно реагувати на зміни швидкості вітру, що особливо важливо для забезпечення стабільного електропостачання споживачів.

Висновки до розділу

1. В роботі представлено комплексне моделювання ключових елементів мікромережі, що включає детальний аналіз синхронного генератора з постійними магнітами, діодного випрямляча на основі повномостової схеми та DC-DC перетворювача підвищувального типу. Кожен компонент розглянуто з урахуванням його специфічних характеристик та впливу на загальну ефективність системи.

2. Особливу увагу приділено розробці та імплементації контролера максимальної потужності на основі алгоритму Perturb and Observe (P&O MPPT). Цей контролер забезпечує одночасне відстеження точки максимальної потужності вітрогенератора та підтримку стабільної вихідної напруги підвищувального перетворювача. Застосування такого підходу дозволяє оптимізувати енергоефективність системи при змінних погодних умовах.

3. Дослідження включало всебічний аналіз результатів комп'ютерного моделювання, зосереджений на двох ключових аспектах: функціонуванні вітротурбіни та характеристиках DC-DC перетворювача. Отримані дані демонструють динамічні характеристики системи, включаючи перехідні процеси, стабільність роботи та ефективність перетворення енергії при різних режимах експлуатації. Проведене моделювання підтверджує ефективність запропонованих технічних рішень та їх відповідність вимогам сучасних мікромереж.

4. Моделювання аеродинамічних характеристик вітротурбіни охоплювало детальне дослідження взаємодії між повітряним потоком та вітроколесом, з особливим акцентом на аналізі впливу швидкості вітру та кута нахилу лопатей на ефективність перетворення енергії. Це дозволило визначити оптимальні режими роботи установки при різних атмосферних умовах.

5. Аналіз функціонування DC-DC перетворювача зосередився на дослідженні трьох ключових параметрів: вихідної напруги, струму та потужності при керуванні за допомогою алгоритму P&O MPPT. Використання цього контролера забезпечило ефективне відстеження точки максимальної потужності та стабільність вихідних характеристик перетворювача.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Надмірний акустичний вплив становить серйозну загрозу здоров'ю людини, що підтверджено численними науковими дослідженнями. Інтенсивність негативних наслідків визначається комплексом факторів, серед яких: гучність звукових коливань, їх частотні характеристики, періодичність впливу, а також індивідуальна чутливість організму до акустичного навантаження.

Надлишковий шумовий фон виступає потужним фізіологічним стресором, який здатний порушувати нормальне функціонування практично всіх систем людського організму. Сучасні медичні дослідження демонструють, що тривала експозиція до підвищених рівнів шуму може призводити до розвитку широкого спектру патологічних станів: від розладів нервової системи та психоемоційної сфери до серйозних порушень роботи серцево-судинної системи.

Серед найбільш поширених наслідків хронічного шумового впливу варто відзначити: гіпертонічну хворобу, ішемічну хворобу серця, виразкові ураження шлунково-кишкового тракту, метаболічні порушення та прогресуючу втрату слуху. Особливо небезпечним є вплив шуму в нічний час, коли організм потребує повноцінного відпочинку для відновлення.

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, постійний вплив шуму понад 85 децибел може призвести до незворотної втрати слуху. При цьому навіть відносно невисокі рівні шуму (55-65 дБ) при тривалому впливі здатні викликати порушення сну, підвищення артеріального тиску та загострення хронічних захворювань.

Медична статистика демонструє тривожну тенденцію: в структурі сучасної захворюваності стрімко зростає відсоток патологій, безпосередньо пов'язаних з акустичним навантаженням. Це явище особливо характерне для урбанізованих територій, де рівень шумового забруднення постійно

підвищується.

Примітним є той факт, що за мільйони років біологічної еволюції людський організм не зміг розвинути ефективних механізмів протидії надмірному шумовому впливу. Особливо вразливим залишається слуховий апарат – надзвичайно складна та чутлива система, яка позбавлена природних захисних бар'єрів від інтенсивних акустичних подразників.

На відміну від інших екологічних факторів, до яких людство поступово адаптувалося протягом свого розвитку (температурні коливання, зміни освітлення тощо), шумове навантаження залишається відносно новим викликом для нашої фізіології. Сучасні рівні антропогенного шуму значно перевищують ті, з якими стикалися наші предки, що робить цей фактор особливо небезпечним для здоров'я.

Дослідження в галузі еволюційної біології та медицини підтверджують, що відсутність природної адаптації до інтенсивного шуму є серйозною проблемою, особливо в контексті постійного технологічного розвитку та урбанізації, які супроводжуються подальшим зростанням акустичного забруднення навколишнього середовища.

Вплив шуму на людський організм можна розділити на кілька характерних діапазонів залежно від його інтенсивності. Акустичне навантаження до 50 децибелів за шкалою А (дБА) вважається відносно безпечним для здоров'я під час виконання професійних обов'язків. Такий рівень приблизно відповідає тихій розмові або звукам спокійної вулиці.

При підвищенні рівня шуму до 50-60 дБА починають проявлятися когнітивні порушення. На цьому рівні відбувається помітне зниження продуктивності інтелектуальної праці: погіршується здатність до концентрації, сповільнюється швидкість обробки інформації, знижується ефективність прийняття рішень. Особливо чутливими до такого шумового навантаження є працівники розумової праці, програмісти, аналітики та інші фахівці, чия робота вимагає високого рівня уваги.

Найбільш небезпечним є діапазон 65-90 дБА, при якому спостерігаються виражені фізіологічні зміни в організмі. В цьому діапазоні активізується симпатична нервова система, що призводить до:

- прискорення серцевого ритму;
- підвищення артеріального тиску
- вазоконстрикції (звуження кровоносних судин);
- порушення мікроциркуляції крові в тканинах та органах.

Вплив інтенсивного шуму понад 90 дБА може спричиняти серйозні порушення в роботі різних органів і систем організму. На цьому рівні відбувається значне погіршення слухової функції, з'являються розлади шлунково-кишкового тракту, виникає характерний симптомокомплекс: нудота, інтенсивний головний біль та постійний тинітус (шум у вухах).

Особливо небезпечним є вплив надпотужного шуму з рівнем 120 дБА і вище, який спричиняє безпосереднє механічне пошкодження слухового апарату. При такій інтенсивності можуть виникати:

- порушення анатомічних зв'язків між структурами внутрішнього вуха;
- травматичні ушкодження барабанної перетинки;
- незворотна втрата слуху.

Важливо розуміти, що екстремально високі рівні шуму здійснюють руйнівний вплив не лише на органи слуху. Акустичні хвилі такої потужності здатні проникати через шкірні покриви та викликати вібрацію внутрішніх органів і тканин. Це призводить до:

- дегенерації нервових клітин;
- мікророзривів капілярів та дрібних кровоносних судин;
- порушення цілісності клітинних мембран;
- розладів мікроциркуляції крові.

За даними досліджень, навіть короточасний вплив шуму такої інтенсивності може призвести до незворотних змін у тканинах організму. Особливо вразливими є структури головного мозку, внутрішнього вуха та периферичної нервової системи. У професійній медицині такі ураження

класифікуються як акустична травма, що може стати причиною тривалої втрати працездатності.

Розглянемо детальніше інженерні рішення та нормативні вимоги щодо зниження шумового навантаження від вітроенергетичних установок індивідуального користування.

Конструктивні особливості для мінімізації шуму:

- застосування тихохідної конструкції забезпечує суттєве зниження аеродинамічного шуму;
- менша кутова швидкість обертання лопатей знижує турбулентність повітряних потоків;
- зменшується вібрація всієї конструкції завдяки більш плавному руху;
- використання трифазної системи з оптимізованим розташуванням котушок;
- зміщення котушок відносно магнітів на $2/3$ забезпечує рівномірний розподіл навантаження;
- суттєве зниження вібрації порівняно з однофазними генераторами;
- підвищення загальної ефективності роботи установки.

Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 "Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку", встановлюються чіткі вимоги щодо допустимих рівнів шуму на робочих місцях. При цьому враховуються:

- специфіка виробничих процесів;
- характер виконуваних робіт;
- тривалість впливу шуму;
- особливості технологічного обладнання;
- вимоги до концентрації уваги працівників.

Дотримання цих норм є обов'язковим для забезпечення безпечних умов праці та запобігання негативному впливу шуму на здоров'я персоналу, який обслуговує вітроенергетичні установки.

Ураження електричним струмом виникає за різних обставин контакту людського тіла з електричними системами. Це може статися через безпосередній дотик до компонентів електрообладнання, які перебувають під різними електричними потенціалами, або коли потенціал цих елементів відрізняється від заземлення. Небезпечні ситуації також виникають при формуванні електричної дуги між складовими електроустановки, або між ними та особою, що має заземлення. Особливо небезпечним є вплив напруги кроку, яка утворюється при розтіканні струму в ґрунті.

Варто додати, що електротравми можуть спричинити різні за тяжкістю наслідки: від легких подразнень до летальних випадків. Основними факторами, що визначають тяжкість ураження, є:

- сила струму та тривалість його впливу;
- шлях проходження струму через організм;
- індивідуальні особливості людини;
- умови навколишнього середовища (вологість, температура);
- тип струму (змінний чи постійний).

Для запобігання електротравмам застосовують різноманітні засоби захисту: ізоляцію, заземлення, захисне відключення, огороження небезпечних зон, використання засобів індивідуального захисту та регулярне проведення інструктажів з електробезпеки.

Явище електротравматизму з точки зору соціального впливу аналізується через комплексне дослідження випадків ураження електричним струмом у визначений період. Ця оцінка включає аналіз кількісних показників, статистичний розподіл за рівнем тяжкості пошкоджень та секторами економічної діяльності.

Статистичні дані демонструють особливу небезпечність електричних травм: хоча їхня частка у загальній структурі виробничого травматизму відносно незначна – близько 1%, вони становлять суттєву частину летальних випадків на виробництві (15-20%). Така диспропорція вказує на критично високу небезпечність електротравм та їх тенденцію призводити до тяжких

наслідків.

Характерною рисою розподілу електротравматизму за рівнем напруги є те, що переважна більшість смертельних випадків (70-80%) трапляється при роботі з електроустановками низької напруги – до 1 кВ. Натомість на обладнання з напругою понад 1 кВ припадає відносно менша частка фатальних інцидентів (20-30%).

Така статистика пояснюється не лише тим, що низьковольтне обладнання значно поширеніше у виробничому середовищі. Ключовим фактором є його доступність для широкого кола працівників, включаючи тих, хто не має спеціальної електротехнічної підготовки та належного розуміння потенційних небезпек електричного струму.

Важливо зазначити додаткові аспекти цієї проблеми:

- працівники часто недооцінюють ризики при роботі з низьковольтним обладнанням;
- нижчий рівень контролю за доступом до установок напругою до 1 кВ;
- менш суворі вимоги до захисного обладнання порівняно з високовольтними установками;
- частіший контакт персоналу з низьковольтним обладнанням у повсякденній роботі;

Для покращення ситуації необхідно:

- посилити навчання персоналу щодо ризиків роботи з електроустановками будь-якої напруги;
- впровадити суворіші протоколи доступу до електрообладнання;
- забезпечити належний контроль за виконанням правил електробезпеки;
- регулярно проводити оцінку знань та навичок працівників у сфері електробезпеки;

Такий комплексний підхід допоможе знизити рівень травматизму при роботі з електроустановками різних класів напруги.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У процесі аналізу було досліджено функціонування мікромереж на постійному струмі, що працюють відокремлено від загальної електромережі. Особлива увага приділялася вивченню малопотужних вітрогенераторів – їхній конструкції, складових елементів та актуальним тенденціям розвитку ринку цього обладнання.

2. Детально проаналізовано фізичні основи та технологічні аспекти перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію. Проведено порівняльний аналіз різних підходів до забезпечення стабільності напруги та керування енергетичними потоками в таких системах. Окремо розглянуто силові електронні перетворювачі, що застосовуються у вітроенергетичних установках, їхні особливості та характеристики.

3. В ході дослідження проаналізовано різноманітні стратегії керування потужністю вітроенергетичних установок. Особливу увагу приділено алгоритмам пошуку та утримання точки максимальної потужності (MPPT - Maximum Power Point Tracking), які забезпечують оптимальний режим роботи вітрогенератора при змінних швидкостях вітру.

4. Дослідження проектування мікромережі постійного струму зосереджено на використанні малої вітрової турбіни як основного джерела енергії. Такий підхід є перспективним завдяки низькому рівню втрат у системах постійного струму, а також можливості їхньої гнучкої адаптації до локальних умов.

5. В роботі представлено комплексне моделювання ключових елементів мікромережі, що включає детальний аналіз синхронного генератора з постійними магнітами, діодного випрямляча на основі повномостової схеми та DC-DC перетворювача підвищувального типу. Кожен компонент розглянуто з урахуванням його специфічних характеристик та впливу на загальну ефективність системи.

6. Особливу увагу приділено розробці та імплементації контролера максимальної потужності на основі алгоритму Perturb and Observe (P&O MPPT). Цей контролер забезпечує одночасне відстеження точки максимальної потужності вітрогенератора та підтримку стабільної вихідної напруги підвищувального перетворювача. Застосування такого підходу дозволяє оптимізувати енергоефективність системи при змінних погодних умовах.

7. Дослідження включало всебічний аналіз результатів комп'ютерного моделювання, зосереджений на двох ключових аспектах: функціонуванні вітротурбіни та характеристиках DC-DC перетворювача. Отримані дані демонструють динамічні характеристики системи, включаючи перехідні процеси, стабільність роботи та ефективність перетворення енергії при різних режимах експлуатації. Проведене моделювання підтверджує ефективність запропонованих технічних рішень та їх відповідність вимогам сучасних мікромереж.

8. Моделювання аеродинамічних характеристик вітротурбіни охоплювало детальне дослідження взаємодії між повітряним потоком та вітроколесом, з особливим акцентом на аналізі впливу швидкості вітру та кута нахилу лопатей на ефективність перетворення енергії. Це дозволило визначити оптимальні режими роботи установки при різних атмосферних умовах.

9. Аналіз функціонування DC-DC перетворювача зосередився на дослідженні трьох ключових параметрів: вихідної напруги, струму та потужності при керуванні за допомогою алгоритму P&O MPPT. Використання цього контролера забезпечило ефективне відстеження точки максимальної потужності та стабільність вихідних характеристик перетворювача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
4. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
5. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
6. Rabiee, Abdorreza, Hossein Khorramdel, and Jamshid Aghaei. "RETRACTED: A review of energy storage systems in microgrids with wind turbines." (2013): 316-326.
7. Alzahrani, Ahmad, et al. "Optimum sizing of stand-alone microgrids: Wind turbine, solar photovoltaic, and energy storage system." Journal of Energy Storage 73 (2023): 108611.

8. Engleitner, Raffael, et al. "Dynamic analysis of small wind turbines frequency support capability in a low-power wind-diesel microgrid." *IEEE Transactions on Industry Applications* 54.1 (2017): 102-111.
9. Shi, Xiaolong, et al. "Impacts of photovoltaic/wind turbine/microgrid turbine and energy storage system for bidding model in power system." *Journal of Cleaner Production* 226 (2019): 845-857.
10. Arani, Mohammadreza FM, and Yasser Abdel-Rady I. Mohamed. "Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability." *IEEE Transactions on Power Systems* 30.1 (2014): 385-396.
11. Mansour Lakouraj, Mohammad, et al. "Optimal market-based operation of microgrid with the integration of wind turbines, energy storage system and demand response resources." *Energy* 239 (2022): 122156.
12. Kou, Peng, et al. "Stochastic coordination of plug-in electric vehicles and wind turbines in microgrid: A model predictive control approach." *IEEE Transactions on Smart Grid* 7.3 (2015): 1537-1551.
13. Alayi, Reza, et al. "Optimal load frequency control of island microgrids via a PID controller in the presence of wind turbine and PV." *Sustainability* 13.19 (2021): 10728.
14. Neely, J., et al. "Wind turbine emulation for intelligent microgrid development." 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2012.
15. Talari, Saber, Mohsen Yazdaninejad, and Mahmoud-Reza Haghifam. "Stochastic-based scheduling of the microgrid operation including wind turbines, photovoltaic cells, energy storages and responsive loads." *IET Generation, Transmission & Distribution* 9.12 (2015): 1498-1509.
16. Mokryani, Geev, Pierluigi Siano, and Antonio Piccolo. "Optimal allocation of wind turbines in microgrids by using genetic algorithm." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 4 (2013): 613-619.

17.Konečná, Eva, Sin Yong Teng, and Vítězslav Máša. "New insights into the potential of the gas microturbine in microgrids and industrial applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020): 110078.

18.Zhou, Zhichao, and Leijiao Ge. "Operation of stand-alone microgrids considering the load following of biomass power plants and the power curtailment control optimization of wind turbines." *IEEE Access* 7 (2019): 186115-186125.

19.Pahasa, Jonglak, and Issarachai Ngamroo. "Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid." *IEEE Systems Journal* 10.1 (2014): 97-105.

20.Hossain, M. Jahangir, et al. "Robust control for power sharing in microgrids with low-inertia wind and PV generators." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 6.3 (2014): 1067-1077.

21.Shayeghi, Hossein, and Masoud Alilou. "Distributed generation and microgrids." *Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids*. Academic Press, 2021. 73-102.