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

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___“ _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

“ Дослідження режимів роботи вітрового генератора з синхронним генератором на постійних магнітах ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____Дмитро КОМАРІ
«____»_____2023 р.
Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Іван САВЕЛЕНКО
«_____»_____2023 р.
Рецензент _____
_____

м. Кропивницький

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
_____ *Плєшков П.Г.*
«_____»_____2023 р.

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

Комарі Дмитро Сергійович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Дослідження режимів роботи вітрового генератора з синхронним генератором на постійних магнітах*
Investigation of operating modes of a wind turbine with a permanent magnet synchronous generator energy supply system of a water treatment plant by using a biogas plant

2. Керівник роботи (проекту) *Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *30.12.2023 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)
Провести аналіз порівняльних систем генерування, орієнтованих на різні типи машин. Розробити структуру генерування за допомогою СГПМ. Подати узагальнене векторне управління та математичну модель СГПМ з параметрами системи генерування, що базується на синхронній машині. Створити модель управління вітровою установкою на основі СГПМ, дослідити її у Simulink в середовищі Matlab.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н, доц. Савеленко І.В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ.*	*10.10.23*	
2	*Провести аналіз порівняльних систем генерування, орієнтованих на різні типи машин.*	*17.10.23*	
3	*Розробити структуру генерування за допомогою СГПМ.*	*30.10.23*	
4	*Подати узагальнене векторне управління та математичну модель СГПМ з параметрами системи генерування, що базується на синхронній машині.*	*18.11.23*	
5	*Створити модель управління вітровою установкою на основі СГПМ, дослідити її у Simulink в середовищі Matlab*	*03.12.23*	
6	*Охорона праці*	*10.12.23*	
7	*Висновки*	*16.12.23*	
8	*Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи*	*30.12.23*	

Дата видачі завдання
«____» _____2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання
«____» _____2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Комарі Д.С. **Дослідження режимів роботи вітрового генератора з синхронним генератором на постійних магнітах.**

Investigation of operating modes of a wind turbine with a permanent magnet synchronous generator

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2023 р.

Представлено математичні моделі компонентів системи генерації, засновані на синхронному генераторі з постійними магнітами. Розроблено та тестова система управління економікою таким генератором у системі координат, орієнтованих на вектор потокозчеплення ротора. Також розроблено систему регулювання швидкості вітротурбіни, яка забезпечує максимальну ефективність при швидкості нижче номінальної та обмежує потужність при швидкості вище номінальної. При цьому забезпечується оптимальна робота вітротурбіни в різних умовах експлуатації.

Робота вирішує актуальні проблеми в галузі розвитку систем генерації електроенергії, зосереджуючись на використанні сучасних технологій та оптимізації процесів керування відновлювальними джерелами енергії.

СИНХРОНИЙ ГЕНЕРАТОР З ПОСТІЙНИМИМ МАГНІТАМИ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, РЕЖИМ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ABSTRACT

Komari D. Investigation of operating modes of a wind turbine with a permanent magnet synchronous generator.

Дослідження режимів роботи вітрового генератора з синхронним генератором на постійних магнітах.

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP " Electrical systems of power consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2023.

Mathematical models of power generation components based on a permanent magnet synchronous generator are presented. A control system for managing the economy of such a generator in a coordinate system oriented to the rotor flux vector has been developed and tested.

Additionally, a speed regulation system for a wind turbine has been designed, ensuring maximum efficiency at speeds below the nominal and limiting power at speeds above the nominal. This ensures optimal operation of the wind turbine under various operating conditions.

The work addresses current challenges in the development of power generation systems, focusing on the use of modern technologies and the optimization of control processes for renewable energy sources.

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR, VECTOR CONTROL, SPEED REGULATION, MATHEMATICAL MODELING.

Зміст

ВСТУП 8
1 АНАЛІЗ ПОРІВНЯЛЬНИХ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ, ОРІЄНТОВАНИХ НА РІЗНІ ТИПИ МАШИН 12
1.1 Порівняння існуючих систем генерації 12
1.2 Структура системи генерування на основі СГПМ 21
1.3. Загальні принципи векторного управління синхронним генератором з постійними магнітами 24
Висновки до Розділу 1 27
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА 28
2.1 Дослідження характиристик вітрової 29
2.2 Математична модель синхронного генератора з постійними магнітами 31
2.3 Формалізація завдання регулювання швидкості вітрового генератора 35
Висновки з Розділу: 40
3 РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ГЕНЕРАТОРА 41
3.1 Аналіз робочих параметрів вітрогенераторної системи 41
3.2 Обґрунтування потужності вітрового генератора 43
Висновки з розділу: 49
4 РЕЗУЛЬТАТИ КОМП’ЮТЕРНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЮВАНН ШВИДКОСТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 63

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 65
ДОДАТКИ 68
Додаток А 69
А.1.Заходи з охорони праці 69
А.2. Розрахунок заземлення 73

ВСТУП

На сучасному етапі технологічного розвитку виникає нагальна потреба у підвищенні техніко-економічної ефективності електроприводів. Основні вимоги включають розширення діапазону регулювання швидкості обертання та покращення енергетичних, статичних і динамічних характеристик. У зв'язку з цим, зростає зацікавленість у використанні систем вітрової генерації на базі синхронного генератору на постійних магнітах (СГПМ), який відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного та стабільного виробництва електроенергії.

Дослідження режимів роботи вітрового генератора з СГПМ є важливим напрямком в розвитку вітрової енергетики, спрямованим на оптимізацію технічних характеристик та підвищення ефективності цього типу електрогенераторів. У цьому контексті дослідження, присвячене вивченню різних режимів роботи вітрового генератора з СГПМ, є важливим етапом для розуміння його динамічних властивостей та можливостей у різних умовах експлуатації.

Вітрогенератори, що використовують синхронні генератори на постійних магнітах (СГПМ), зростають в популярності в промислових галузях, де раніше використовувалися постійні струмові чи асинхронні двигуни. Це пояснюється значними перевагами таких машин, такими як відсутність втрат на збудження і змінний щітковий контакт, що сприяє вищому коефіцієнту корисної дії (ККД). Статор СГПМ зазвичай є повністю герметичним і використовує рідинне охолодження, що підвищує надійність двигуна. Крім того, вони практично не вимагають обслуговування протягом всього терміну служби та мають низькі втрати на тертя, радіочастотні перешкоди і шуми.

Зокрема, синхронні двигуни з постійними магнітами характеризуються мінімальною питомою масою порівняно з іншими

видами машин, що визначається високим відношенням крутного моменту до маси двигуна. В порівнянні з асинхронними двигунами, СГПМ володіють вищою ефективністю (завдяки відсутності втрат на збудження), меншим тепловиділенням та більшим діапазоном регулювання швидкості. Зазначені переваги роблять синхронні машини з постійними магнітами привабливими для застосування в різних сферах, включаючи альтернативну енергетику, де вимагається висока ефективність.

Раніше широке застосування електроприводів відновлюваної енергетики на базі синхронних генераторів з постійними магнітами стримувалося через низку недоліків, зокрема потреба у використанні частотних перетворювачів напруги, відносно висока вартість через застосування дорогих постійних магнітів та складні системи автоматичного керування.

Проте стрімкий прогрес у технологіях виробництва магнітів на основі рідкісноземельних металів і напівпровідникової техніки дозволив суттєво здешевити вартість електроприводів з синхронними генераторами постійного магнітного поля. Це зумовило їх ширше застосування в різних галузях, зокрема для тягового електроприводу.

Вдосконалення систем автоматичного керування є одним з напрямків поліпшення техніко-економічних показників тягових електроприводів на базі синхронних машин. Значний внесок у розв'язання задач автоматизації режимів роботи електроприводів змінного струму, включаючи на основі синхронних генераторів з постійними магнітами, зробили провідні науковці, серед яких В.Б. Клепіков, Д.Й. Родькін, А.В. Садовий тощо.

Роботи цих дослідників враховують особливості малих СГПМ у системах автоматичного керування, ґрунтуючись на класичній теорії. Однак застосування таких підходів для електроприводів на базі СГПМ середньої та великої потужності не завжди забезпечує потрібну швидкість та точність функціонування через недостатнє врахування їх технічних

характеристик.

Системи автономного генерування, що базуються на синхронних машинах, набули широкого використання завдяки їхній високій продуктивності. Використання методів векторного керування дозволяє реалізувати різноманітні стратегії оптимізації роботи електричних машин і підвищити ефективність перетворення механічної енергії в електричну. При змінній швидкості джерела механічної енергії та низькій механічній потужності на вході генератора, підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії стає ключовим аспектом, тоді як при великій потужності важливим стає точне керування кутовою швидкістю та моментом генератора.

Отже, дослідження та удосконалення алгоритмів векторного керування синхронними генераторами, які забезпечують керування системою генерування, залишається нагальним завданням. Це важливо для забезпечення оптимальної продуктивності та ефективності в умовах змінних умов роботи.

У даній роботі зосереджено увагу на аналізі та оптимізації режимів роботи вітрового генератора з СГПМ з метою підвищення його продуктивності та внесення вкладу в стале та екологічно чисте виробництво енергії.

Мета дослідження: Розробка та дослідження методом моделювання системи генерування електроенергії на базі векторно-керованого синхронного генератора з постійними магнітами, що забезпечує ефективну роботу вітрової турбіни при зміні швидкості вітру.

Завдання дослідження:

Огляд науково-технічної літератури для визначення методів векторного керування синхронними генераторами.

Розробка алгоритмів керування автономною системою генерації з синхронним генератором для ефективної генерації електроенергії за змінної

швидкості обертання вітротурбіни.

Створення та дослідження імітаційних моделей системи генерації з використанням векторного керування синхронним генератором.

Тестування розроблених алгоритмів керування методом математичного моделювання в різних режимах роботи.

Об'єкт дослідження – процеси в автономній системі генерації електроенергії на базі синхронного генератора з постійними магнітами в умовах зміни швидкості обертання.

Предмет дослідження – локальна система генерування електроенергії синхронним генератором з постійними магнітами з використанням векторного керування.

1 АНАЛІЗ ПОРІВНЯЛЬНИХ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ, ОРІЄНТОВАНИХ НА РІЗНІ ТИПИ МАШИН

1.1 Порівняння існуючих систем генерації

Елемент вітроенергетичного устаткування, а саме вітрогенератор, становить основу автономних вітроустановок. Окрім своєї основної функції у виробництві електроенергії, генератор зобов'язаний виконувати завдання зі стабілізації та регулювання параметрів, що визначають якість згенерованої електроенергії.

Дослідження в цій області активно ведуть вчені всього світу, спрямовані на розгляд можливостей експлуатації асинхронного генератора з подвійним живленням, вивчення комутованого реактивного синхронного генератора, тестування керованого реактивного синхронного генератора для установок без редуктора, а також аналіз роботи асинхронного генератора з короткозамкненим ротором, обладнаного системою тиристорного керування реактивною потужністю в ланцюзі статора, тощо [4].

Для генерації енергії в вітроенергетичних установках використовуються різні типи генераторів які наведені на рис. 1.1.

Кожен з названих типів генераторів має свої переваги та обмеження.

Асинхронний генератор з короткозамкненим ротором вирізняється численними перевагами, такими як низька вартість, простота та надійність в обслуговуванні, а також невеликі коливання генерованої потужності, електромагнітного моменту та струму при паралельній роботі та змінній швидкості вітру. Застосування асинхронного генератора дозволяє встановлювати вітрогенератори без редукторної системи з високими масо-габаритними характеристиками, ККД з можливістю проводити в широкому діапазоні регулювання напруги та частоти.

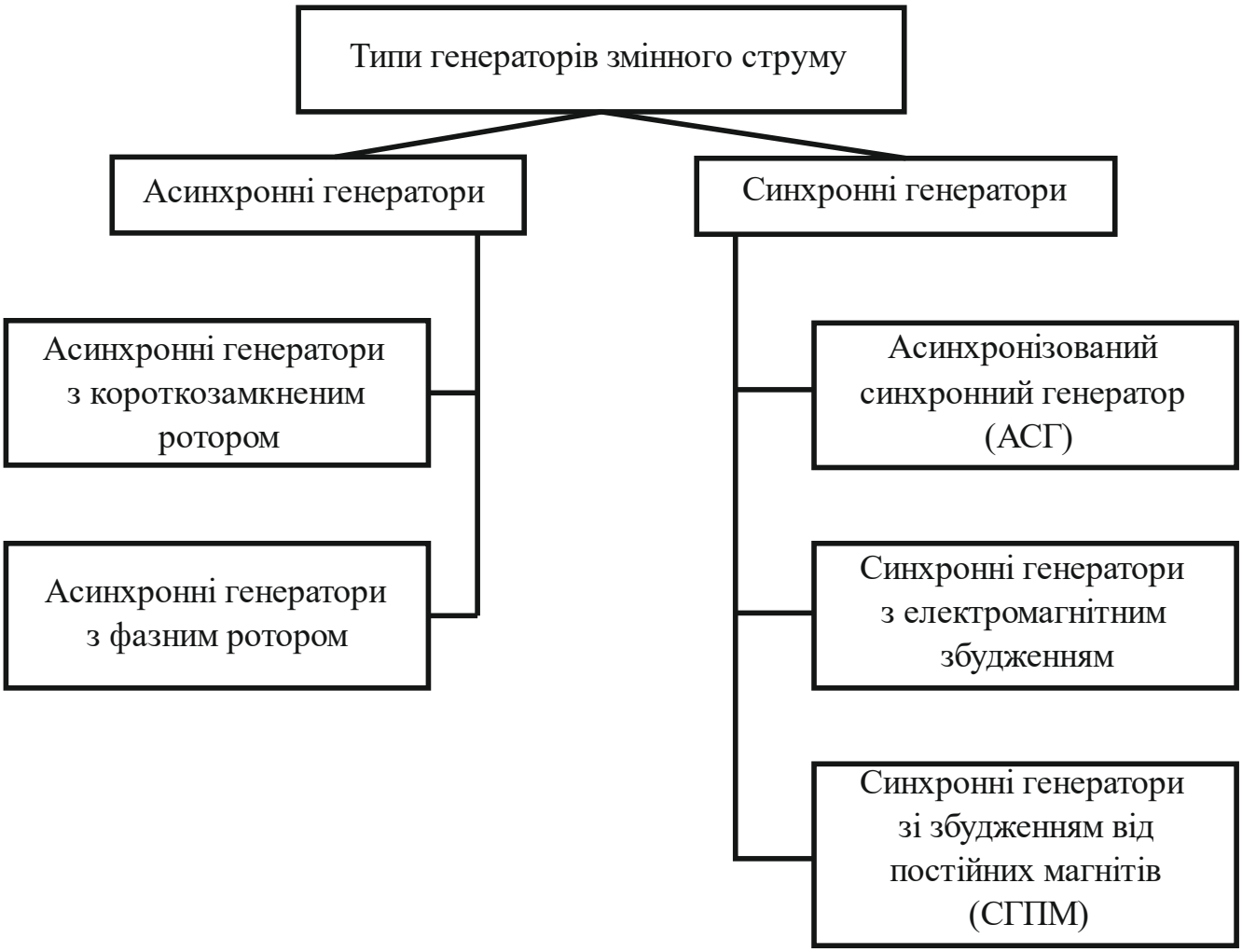

Рис.1.1. Типи генераторів, які використовуються в вітроенергетичних установках

Асинхронний генератор з фазним ротором може бути використаний у самостійних системах в поєднанні з іншими типами генераторів. Можливе каскадне з'єднання двох асинхронних генераторів або їх спільне використання з допоміжними джерелами живлення з паралельним збудженням. Варто відзначити їхні невеликі коливання генерованої потужності, електромагнітного моменту та струму при одночасній роботі та при змінній швидкості вітру та його поривах. Проте, через присутність ковзного контакту, надійність асинхронного генератора з фазним ротором може бути пониженою.

Загальними недоліками використання асинхронних генераторів є те,

що при застосуванні недорогих низькошвидкісних турбін, з частотою обертання до 30 обертів/хв), для генератор обов'язково потрібен редуктор із коефіцієнтом редукції ($К_{ред}$) близько 60, що призводить до додаткових витрат на установку, обслуговування та ремонт, знижуючи надійність та викликаючи механічний шум.

При роботі асинхронного генератора в таких умовах важко керувати режимними параметрами, що стає критичним при уривчастому вітрі, та обмежує його промислове використання через спотворення форми вихідної напруги та низькі динамічні характеристики.

Генератори з електромагнітним збудженням у синхронних системах мають менший рівень популярності, основні причини цього включають в себе вищу вартість, більш складну конструкцію та меншу надійність порівняно з асинхронними генераторами. Також важливим недоліком є наявність ковзного контакту і обов'язковість постійного джерела струму для збуджувальної обмотки. У випадку відсутності редуктора конструкція ускладнюється, а вага та вартість збільшуються. Зауважується жорстка залежність частоти ЕРС від швидкості обертання, що обмежує можливість використання синхронних генераторів для прямого підключення до мережі без проміжного пристрою частотного управління.

Ще однією недолік використання синхронних генераторів з електромагнітним збудженням є необхідність використання пристроїв, таких як перетворювач з постійним струмом та інвертор напруги, для забезпечення необхідних параметрів струму та напруги з прийнятними технічними характеристиками. За цим аспектом, втім, можна відзначити перевагу у застосуванні широкосмугової модуляції, яка дозволяє отримати низький рівень гармонікою у струмі, поліпшити динамічні характеристики об'єкта.

Зокрема, системи з електромагнітним збудженням можуть бути корисними у випадках, коли потрібно контролювати реактивну потужність з боку генератора або вимагається покращення динаміки роботи.

Несприятливі аспекти використання цих генераторів, такі як обмежена надійність та складність конструкції, можуть бути подолані за допомогою сучасних технологій у виробництві та управлінні, що сприяє постійному розвитку цієї області.

Синхронні генератори з електромагнітним збудженням менше визнані, по-перше, через їх вищу ціну, складну конструкцію та меншу надійність порівняно з асинхронними генераторами. Також важливим недоліком є присутність ковзного контакту та необхідність джерела постійного струму для збуджувальної обмотки. У випадках, коли не застосовується редукторна установка, конструкція ускладнюється, збільшується вага та вартість. Жорстка залежність частоти ЕРС від швидкості обертання обмежує можливість використання синхронних генераторів для прямого підключення до мережі без проміжного пристрою частотної контроля (ППЧ).

Іншим недоліком у використанні синхронних генераторів з електромагнітним збудженням є потреба в застосуванні перетворювача з ланкою постійного струму та інвертором напруги для забезпечення параметрів струму та напруги з відповідними технічними характеристиками. Зокрема, це важливо при використанні широтно-імпульсної модуляції, яка може забезпечити низький рівень гармонік в струмі та поліпшення динамічних характеристик системи. Однак перевагою є можливість керування реактивною потужністю зі сторони генератора.

Синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів є достатньо популярними. Вони вирізняються відсутністю ковзного контакту, простотою у використанні та високим ККД. Важливою перевагою є також стійкі робочі характеристики протягом тривалого періоду експлуатації, що складає десятки років.

З необхідних удосконалень можна відзначити дорогі постійні

магніти, вартість яких в Україні може бути високою через несформований ринок цієї технології. Також, через сталість магнітного потоку, СГПМ не мають можливості налагодження цього параметра.

Асинхронний генератор, що входить до складу вітроенергетичних установок, застосовується у ВЕУ через можливість інтеграції в автономні системи разом із іншими типами генераторів. Його можна комбінувати у каскадній схемі з асинхронним генератором або взаємодіяти з асинхронним генератором і допоміжним джерелом живлення з паралельним збудженням.

Серед недоліків цього типу генератора можна виділити наступні аспекти: при відхиленні від синхронної швидкості виникає необхідність значного підвищення реактивної потужності і напруги на обмотці збудження; на роторі присутній змінний контакт для передачі напруги до обмотки збудження ротора, а також необхідність використання перетворювача частоти для регулювання напруги збудження; при наближенні ковзання до нуля та наявності несинусоїдальності в інверторі, який живить обмотку збудження, спостерігаються значні субгармоніки в напрузі генератора.

При паралельній роботі та регулюванні напруги залежно від величини та фази ковзання, спостерігаються пульсації в напрузі, які практично відтворюють пульсації моменту вітротурбіни.

При розгляді переліку електричних генераторів, які можуть бути використані у вітроенергетичних установках, можна зазначити, що найбільш економічно та експлуатаційно вигіднішими є асинхронний генератор та генератор із постійними магнітами. Розглянемо їх більш докладно.

Система синхронного генератора подвійного живлення представлений на рис.1.2. Ця конфігурація включає в себе вітротурбіну, редуктор, асинхронний генератор, перетворювач та інші компоненти. Статор прямо підключений до електричної мережі, тоді як ротор з'єднаний

із мережею через використання перетворювача.

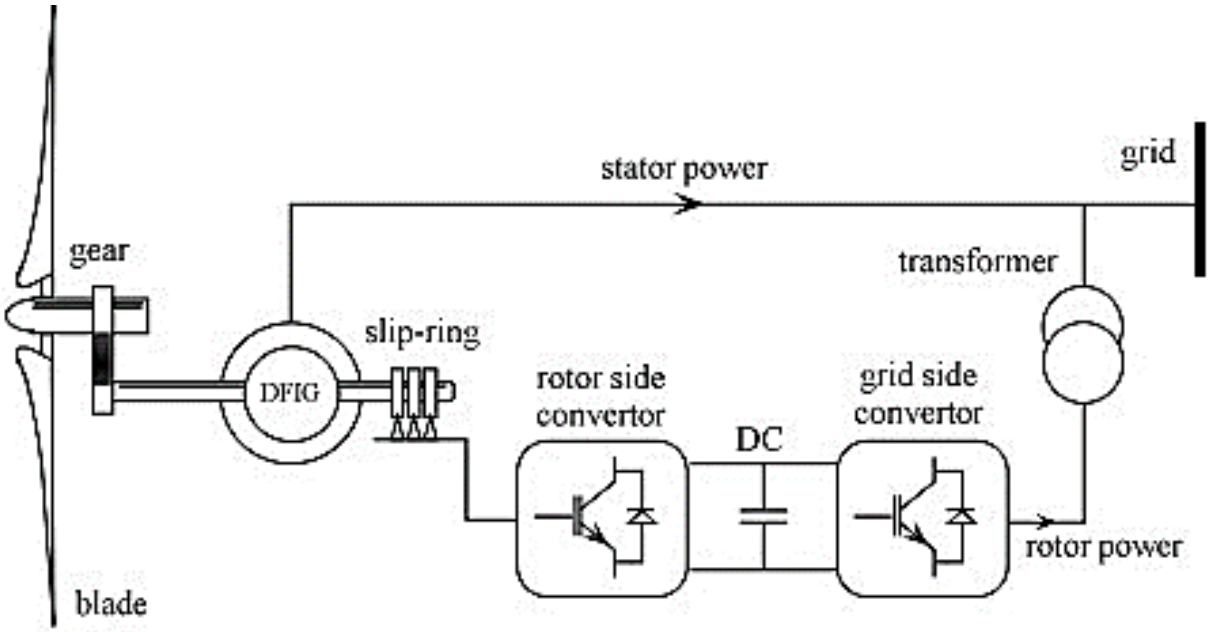

Рис. 1.2. Система синхронного генератора подвійного живлення[5]

Між статором та ротором асинхронного генератора встановлений електромагнітний зв'язок. Управління перетворювачем на роторній стороні регулює струм збудження генератора та налаштовує швидкість обертання для максимізації енергії вітру між заданою та номінальною швидкістю вітру.

Метою керування перетворювачем на стороні мережі є стабілізація напруги в ланці постійного струму та обмін реактивною потужністю з електромережею.

Для ефективного управління активною та реактивною потужністю ротора генератора, перетворювач на роторній стороні використовує пряме перетворення координат осі та метод векторного керування, орієнтованого на потік статора.

При цьому вважається, що вектор магнітного потоку статора є постійним, і опір статора не враховується.

Значення електромагнітного моменту визначається за формулою:

$$M_e = -p_n \psi_s i_{rq} \, {}^{L_m}\!/_{L_1} . \tag{1.1}$$

де L_m і L_1 – індуктивності в контурах намагнічування та статорної обмотки; i_{rd} - реактивний струму ротора; ψ_s - потокозчеплення статора; p_n – число пар полюсів.

Склавши формулу (1.1), можливо зрозуміти, що керування струмом ротора може впливати на електромагнітний момент генератора, що в свою чергу визначатиме швидкість обертання генератора. Регулюючи вихідну напругу перетворювача на роторній стороні, можна налаштовувати активну складову струму ротора.

Перетворювач на стороні мережі вирішується з орієнтацією за вектором напруги електромережі, де зазвичай квадратна вісь визначає напрямок напруги, а постійна напруга u_{dg} залишається нульовою. Далі розглянемо функції вихідної потужності перетворювача на стороні мережі:

$$\begin{aligned} P_g &= u_{qg} i_{qg}, \\ Q_g &= u_{qg} i_{dg}. \end{aligned} \tag{1.2}$$

Функція напруги ланки постійного струму на роторній стороні може бути визначена залежно від параметрів електричної системи та умов роботи генератора. Використовуючи формулу (1.1), де керування струмом ротора впливає на електромагнітний момент генератора, а отже, на його швидкість обертання, можна сформулювати функцію напруги ланки постійного струму на роторній стороні:

$$\frac{C \cdot u_{dc} \cdot du_{dc}}{dt} = P_g - P_s \tag{1.3}$$

де P_g , Q_g - активна та реактивна потужності перетворювача з сторони

мережі; u_{dg} та і u_{qg} – проекції напруги електромережі в системі d-q координат; i_{dg} та i_{qg} – проекція робочого струму перетворювача з сторони мережі в системі d-q координат; u_{dc} - напруга постійного струму; C – ємність представлена у вигляді ланки постійного струму. P_s - активна потужність статора:

$$P_s = \frac{-\omega_1 \cdot \psi_s \cdot i_{1q} \cdot L_m}{L_1}$$

де ω_1 - кутова швидкість статора; i_{1q} – активна складова струму статора.

Формули (1.2) та (1.3) вказують, що можна регулювати напругу ланки постійного струму, використовуючи складову струму по осі q, в той час як реактивну потужність можна контролювати за допомогою складової струму по осі d. Такий підхід до керування дозволяє оптимізувати параметри системи та забезпечує ефективне регулювання електромагнітних параметрів генератора для оптимального вироблення енергії.

Генераторна система вітроенергетичної установки з постійними магнітами (СГПМ).

Структура системи, що базується на СГПМ із прямим приводом, проілюстрована на Рис. 1.3. У моделі присутні турбіна, СГПМ, перетворювач та інші компоненти. Статор СГПМ забезпечує підключення до електромережі через перетворювач.

Перетворювач, розташований на стороні статора, здатен керувати струмом статора генератора, ефективно регулюючи швидкість генератора для максимізації збору енергії вітру. Аналогічно до асинхронного генератора (АГ), для оптимізації активної та реактивної потужності ротора, перетворювач використовує пряме перетворення координат і метод векторного керування, зорієнтованого на потік статора. Керування реактивним струмом i_{sd} = 0 дозволяє отримувати максимальну

ефективність, використовуючи мінімальний активний струм в системі генератора з постійними магнітами (СГПМ). Звичайно, пряма вісь визначає напрямок потоку статора, при цьому потокосполучення по вісі d рівне потокосполученню постійних магнітів $\psi_{ds} = \psi_f$.

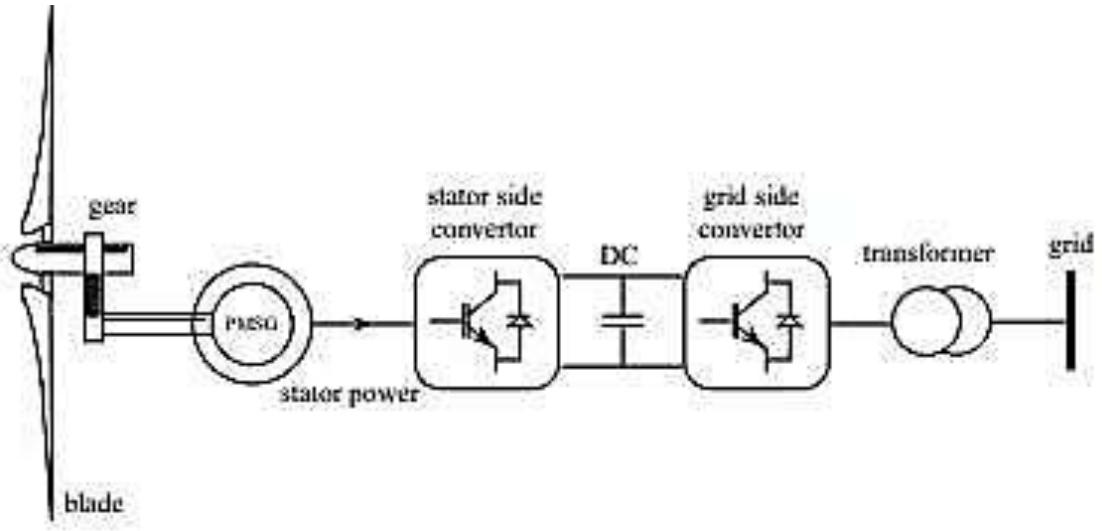

Рис. 1.3. Система вітроенергетичної установки з постійними магнітами (СГПМ) [5]

Знаючи струм та потокозчеплення статора визначаємо електромагнітний момент:

$$M_e = -p_n \psi_f i_{sq}. \tag{1.4}$$

де p_n – число пар полюсів; ψ_f – потокозчеплення від постійних магнітів; i_{sq} -активна складова струму статора.

З виразу (1.4) є очевидним, що регулюючи активну компоненту струму статора, ми можемо впливати на електромагнітний момент. Зазначимо, що активна компонента струму статора залежить від вихідної напруги, що надходить від перетворювача на стороні статора.

Подібно до ситуації з асинхронним генератором (АГ), перетворювач на стороні електричної мережі СГПМ забезпечує сталу напругу в цепі постійного струму та обмінюється реактивною потужністю, регулюючи струмову компоненту перетворювача на стороні електричної мережі.

Отже, в якості електричної машини для автономної вітрогенеруючої установки розглядаємо СГПМ. Це обумовлено відсутністю втрат на збудженні та змінних щіткових контактів, що сприяє вищому ККД. Статор СГПМ зазвичай повністю герметичний і має рідинне охолодження, що підвищує надійність генератора. Вони практично не вимагають обслуговування протягом усього терміну служби, мають менше втрат на тертя, радіочастотні перешкоди та шуми. Крім того, СГПМ має мінімальну питому масу порівняно з іншими машинами, забезпечуючи високий коефіцієнт крутного моменту до маси генератора. Порівняно з асинхронним генератором, СГПМ володіє вищою ефективністю (завдяки відсутності втрат на збудженні), меншим тепловим випромінюванням і широким діапазоном регулювання швидкості.

1.2 Структура системи генерування на основі СГПМ

Електричні машини з постійними магнітами (ЕМПМ) широко використовуються в промисловості через їх виняткову ефективність, низьку потребу в технічному обслуговуванні, компактність та здатність працювати в широкому діапазоні швидкостей [7].

Синхронні генератори на постійних магнітах (СГПМ) особливо підходять для застосувань у низькошвидкісних системах, таких як вітряні турбіни і мікрогідротурбіни [8]. Проте для скорочення розмірів перетворювача електроенергії в низькошвидкісних машинах потрібна механічна коробка передач для збільшення швидкості. Для уникнення

періодичного технічного обслуговування і втрат в коробці передач застосовуються низькошвидкісні синхронні генератори з прямим приводом, оснащені збудженням від постійного магніту, а не від полюсних котушок [9]. Цей тип генератора, хоча має значну масу і потужність, відзначається відсутністю обмоток збудження, що допомагає зменшити втрати в обмотці, а також має безщіткову конструкцію, високий ККД і менші експлуатаційні витрати, порівняно з високошвидкісними машинами, з'єднаними з коробкою передач [10].

Науковці провели значні дослідження щодо інтеграції системи перетворення енергії вітру на основі СГПМ [11-13].

У [8] було запропоновано використання випрямного діодного мосту з підвищуючим перетворювачем для керування на стороні генератора. Ступінь підвищення був регульований для управління швидкістю СГПМ з метою слідування точці максимальної потужності (ТМП).

В [9] використовувався діодний мостовий випрямляч на стороні генератора та тиристорний інвертор на стороні електричної мережі. Завдяки керуванню кутом включення інвертора за допомогою лінійної комутації була досягнута швидкість СГПМ, забезпечуючи відстеження ТМП.

В основі системи СГПМ було використано Z-джерело перетворювача [10].

Представлена стратегія керування з новою конфігурацією системи для автономної системи перетворення енергії вітру на основі СГПМ[11]. В ній автори повідомляють про зворотне підключення перетворювача джерела напруги (ПДН) та інвертора напруги (ІН) СГПМ. Двонаправлений перетворювач постійного струму використовувався в ланці постійного струму для керування акумулятором. Відстеження максимальної потужності було досягнуто за допомогою керування перетворювачем джерела напруги (ПДН) на стороні генератора.

На Рис. 1.4 наведено схему функціонування вітряної установки на основі СГПМ, яка живить трифазні навантаження 0,4 кВ.

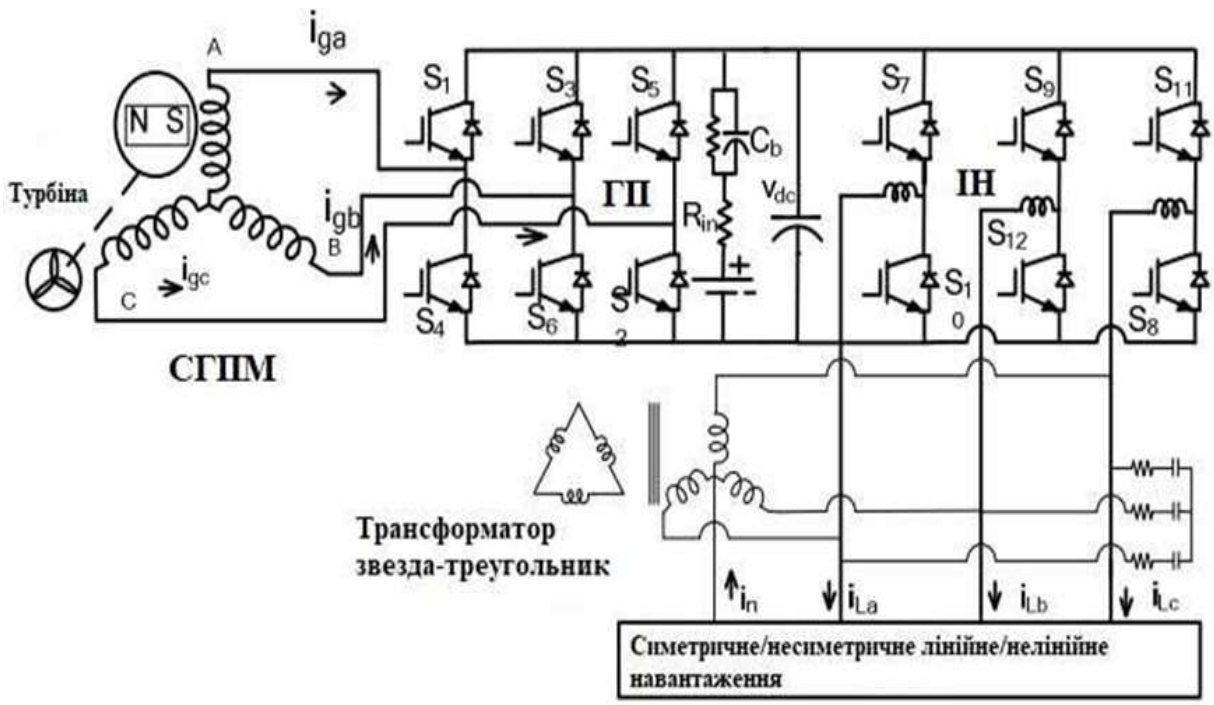

Рис. 1.4. Принципова схема вітряної установки на основі СГПМ для мережі 0,4 кВ[8].

Середня умовна точка кожної гілки перетворювача джерела напруги (ПДН) з'єднана з клемами статора СГПМ. Акумулятор підключений до проміжної ланки постійного струму ПДН та інвертора напруги (ІН), які взаємно підключені та відомі як генераторний перетворювач (ГП) та інвертор на стороні навантаження.

Середня точка кожного плеча напівмоста інвертора напруги на стороні навантаження з'єднана через індуктор зі спільною точкою.

Використання ізольованого трансформатора зірка-трикутник забезпечує стабільну нейтральну клему для споживачів. Високочастотний RC-фільтр підключений в точці загального зв'язку для поглиблення перехідних процесів інвертора на стороні навантаження.

Малошвидкісний СГПМ має прямий зв’язок з вітряною турбіною із змінною швидкістю.

Система зберігання енергії на проміжній ланці постійного струму

акумулятора виконує функцію вирівнювання навантаження. Залежно від швидкості вітру, швидкість СГПМ автоматично налаштовується для досягнення точки максимальної потужності за допомогою вбудованої двовимірної таблиці характеристик вітряної турбіни.

Генераторний перетворювач (ГП) дозволяє СГПМ працювати із змінною швидкістю, регулюючи активну складову потужності генераторних струмів, і перетворює джерело змінної напруги і частоти в джерело постійного струму.

Для мінімізації втрат у СГПМ та забезпечення номінальної потужності на виході генераторного перетворювача, струми генератора утримуються на мінімальному рівні. Це досягається встановлення компоненти реактивної потужності генераторних струмів на нуль. Це призводить до отримання високого коефіцієнта потужності роботи СГПМ. Інвертор на стороні навантаження регулюється для підтримання стабільної величини та частоти напруги на навантаженні.

1.3 Загальні принципи векторного управління синхронним генератором з постійними магнітами

Синхронні машини з постійними магнітами зазвичай відзначаються значним повітряним зазором та низьким ступенем насичення, що спонукає до використання моделей, які ігнорують нелінійність магнітного ланцюга під час їх вивчення. Для приводів на основі таких генераторів найбільш підходящими є системи векторного управління, такі як система, орієнтована за полем, векторне управління (ВУ), і пряме управління моментом (ПУМ).

Ці системи були розроблені у 70-80-х роках XX століття і обидві призначені для контролю моменту та магнітного потоку для точного відтворення заданого шляху руху, незважаючи на зміну параметрів генератора і навантаження при різних впливах. Хоча обидві системи

знаходять застосування в промислових установках, наразі не існує єдиного погляду на те, яка з них є більш перевагами.

У загальному, векторне управління передбачає керування моментом, швидкістю або положенням робочого органу машини, засноване на рівняннях динаміки генератора та взаємозалежній зміні миттєвої фази і амплітуди струму або напруги статора. За допомогою векторного управління змінюється електромагнітний момент, регулюючи амплітуду і миттєву фазу вектору струму статора або вектору статорної напруги [13,15].

Однією з ключових концепцій методу управління орієнтованим полем (FOC)[15] є уявлення про напруги, струми та потокозчеплення електричного генератора як просторових векторів, засноване на орієнтації вектору потокозчеплення, створеного постійними магнітами.

В даному випадку положення просторового вектору визначається положенням ротора. Зміну моменту в цій системі досягають шляхом впливу на струм статора, який виступає керованою величиною.

Метод прямого керування моментом (Direct Torque Control – DTC) [15] був запропонований також для асинхронних генераторів як розвиток векторного підходу до побудови систем управління, але зараз використовується і для інших типів машин змінного струму.

Принцип дії методу базується на виборі вектора напруги з метою одночасного керування моментом і потокозчепленням статора за заздалегідь визначеною таблицею.

Виміряні значення струмів статора і напруги інвертора використовуються для оцінки потокозчеплення та моменту, які порівнюються з заданими сигналами за допомогою гістерезисних компараторів. Тобто, система реалізує одночасне керування моментом і магнітним полем статора за рахунок гістерезисних регуляторів, а керуючі імпульси для силових ключів інвертора формуються шляхом вибору вектора за таблицею перемикань.

Відмінністю від систем з орієнтацією поля є те, що в методі прямого

керування моментом безпосередньо керованою величиною є потокозчеплення статора. Такий підхід дозволяє підвищити динамічні характеристики системи управління та зменшити чутливість до параметричних збурень.

Порівняльний аналіз електроприводів із синхронним генератором з постійними магнітами з векторною системою частотно-струмового керування та системою прямого керування моментом показує, що обидві системи управління мають свої переваги і можуть застосовуватися залежно від вимог технологічного процесу.

Система векторного керування відрізняється нижчими витратами на обчислювальні ресурси та меншою амплітудою пульсацій у сталих режимах. Проте поступається системі прямого керування моментом за рахунок низької стійкості до зміни параметрів і потребує складнішої системи широтно-імпульсної модуляції.

У динамічних режимах система прямого керування моментом краще відпрацьовує завдяки релейному регулятору, але у сталих режимах її показники погіршуються через великі пульсації моменту. Це можна зменшити шляхом підвищення частоти перемикання вентилів інвертора, що обмежено ресурсами процесора.

Отже, системи векторного керування доцільніше застосовувати за малих збурень навантаження і стабільного регулювання, оскільки дають менші втрати завдяки нижчому рівню гармонійних складових напруги живлення. Зменшення інтервалів при розрахунку параметрів в алгоритмі прямого керування моментом дозволяє наблизити його характеристики до векторного керування.

Висновки до Розділу 1

1. У цьому розділі було проведено порівняльний аналіз систем генерування з використанням різних типів електричних машин для виявлення переваг та недоліків кожного варіанту і вибору найбільш оптимального. В результаті для автономної вітрової установки було обрано синхронний генератор з постійними магнітами через відсутність втрат на збудження та колекторного вузла, що забезпечує вищий ККД.

2. Запропоновано структуру системи генерування на базі синхронного генератора з постійними магнітами, яка включає перетворювач і інвертор напруги, ланку постійного струму та акумулятор. Акумулятор під'єднаний до проміжної ланки постійного струму та інвертора напруги, що утворюють генераторний перетворювач і інвертор на стороні навантаження.

3. Розглянуто два методи керування синхронними машинами – векторне полеорієнтоване керування та пряме керування моментом. Враховуючи завдання точного контролю моменту за змінних параметрів, обрано векторне керування через нижчі витрати обчислювальних ресурсів і меншу амплітуду пульсацій у сталих режимах, що є важливим для даної системи генерування.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

У даному розділі розглянуто математичний опис процесів, що відбуваються в системі генерування електроенергії на базі синхронного генератора з постійними магнітами. Розробка адекватної математичної моделі є важливим етапом дослідження та проектування систем керування електроприводом.

Наведені базові рівняння, що описують електромагнітні процеси в синхронній машині. На їх основі з використанням перетворення Парка буде отримана математична модель синхронного генератора з постійними магнітами в ортогональній системі координат d-q.

Для отриманої математичної моделі синхронного генератора з постійними магнітами розроблено структурну схему силового каналу системи генерування та наведено рівняння, що описують роботу її основних елементів - генераторного перетворювача, фільтра та інвертора.

На основі цих математичних моделей буде сформована імітаційна модель системи генерування в середовищі Matlab/Simulink для подальшого дослідження та відпрацювання алгоритмів керування.

Для початку розглянемо моделювання системи вітрової установки, що включає модель вітрового генератора, фізичну модель синхронного генератора з постійними магнітами, а також стратегії керування генераторним і мережевим інверторами.

Для підвищення ефективності відстеження точки максимальної потужності та розв'язки каналів активної і реактивної потужності в системі керування інверторами використовується векторна (ШІМ) зі зворотним зв'язком за струмами в системі координатах d-q [21]. Це дозволяє незалежно керувати активною та реактивною складовими струму і, відповідно, потужності.

Такий підхід забезпечує гнучке управління режимами роботи вітроустановки за рахунок можливості регулювання напруги в ланці постійного струму, підтримання заданого коефіцієнта потужності та інших функцій. Моделювання дозволить дослідити характеристики запропонованої системи керування та оцінити її ефективність.

2.1 Дослідження характиристик вітрової

Характеристики механізму вітрових турбін описують взаємозв'язок між вихідною потужністю Pm та моментом Mm в залежності від обертів за хвилину при різних значеннях вітрового потоку V.

Механічна ефективність вітрового генератора [17] визначається параметрами аеродинаміки, такими як:

$$P_m = 0.5\rho A C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \tag{2.1}$$

де P_m - представляє потужність, яку розвиває вітротурбіна, при певній щільності повітря ρ та площі розгортки лопатей турбіни A (де $A = \pi R^2$), w_v - швидкість вітру в метрах за секунду; C_p - є коефіцієнтом потужності, який вказує на використання вітрового потоку.

Для максимізації вихідної потужності вітру при фіксованому куті нахилу β, кутова швидкість ω турбіни повинна адаптуватися до зміни швидкості вітру, щоб забезпечити стійке співвідношення швидкостей λ.

Номінальна швидкохідність λn визначається структурою вітрової установки. Синхронна швидкохідність λ0 встановлюється при нульовій швидкості вітру. Загальне рівняння, що використовується для моделювання характеристик вітрової турбіни при значеннях λ від λn до λ0, представлено таким чином:

$$C_p = C_{p_\max} - \frac{C_{p_\max}}{(\lambda_0 - \lambda_n)^2}(\lambda - \lambda_n)^2, \tag{2.2}$$

Числове значення λ_0 у виразі (2.2) залежить від кутової швидкості σ_{per}, яка залежить від радіуса R на периферії вітроколеса, шириною кінчика лопаті b_{per} і кількістю лопатей n:

$$\sigma_{per} = \frac{ib_{per}}{R}. \tag{2.3}$$

Знаючи кутову швидкість, після проведення математичних перетворень визначити синхронну швидкоходність турбіни:

$$\lambda_0 = \frac{188.93\sigma_{per} + 20.62}{28.22\sigma_{per} - 1} \tag{2.4}$$

Тоді крутний момент на валу турбіни визначається за формулою:

$$M = \frac{P_m}{v_\omega}. \tag{2.5}$$

З формули (2.5) можна вивести висновок, що механічний крутний момент значно залежить від швидкості вітру. На базі цих рівнянь можна створити модель вітряної турбіни, описаної на рис. 2.1.

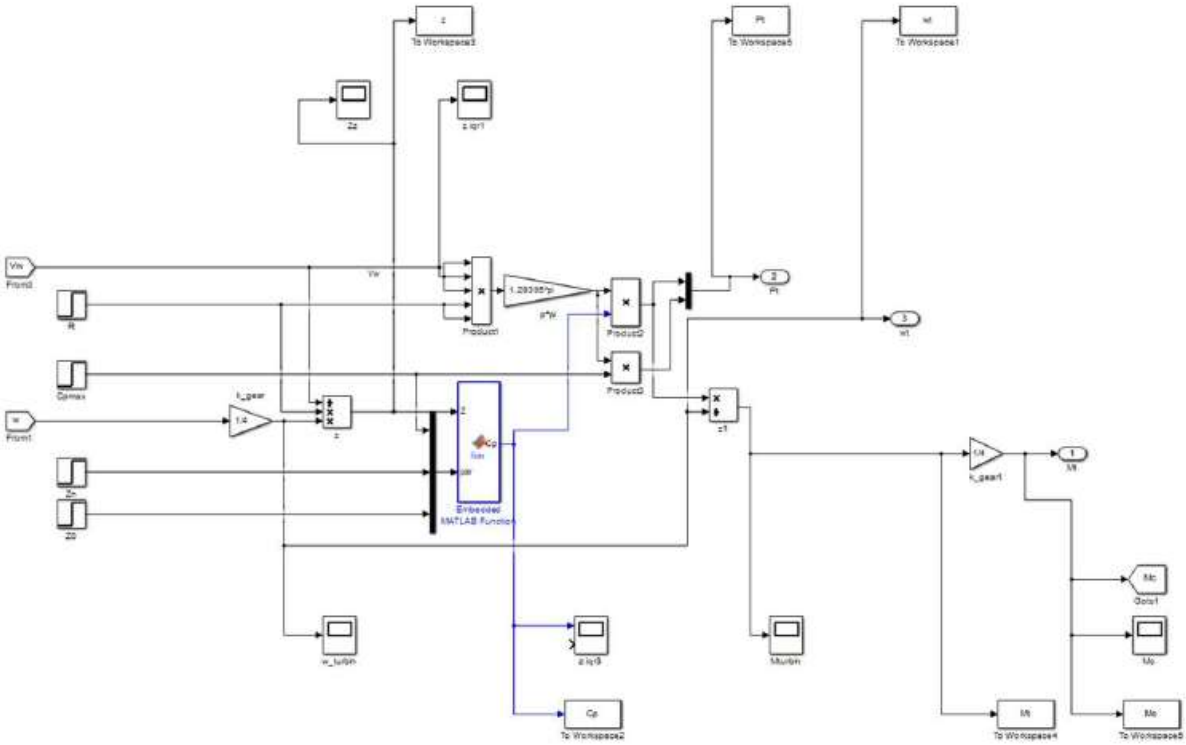

Рис. 2.1 – Модель турбіни вітрового генератора

2.2 Математична модель синхронного генератора з постійними магнітами

Для аналізу електромагнітних процесів у синхронних машинах з магнітами постійного типу повністю підходить теорія, яка властива синхронним двигунам з класичним електромагнітним збудженням [1].

Для створення математичної моделі СГПМ необхідно зробити кілька припущень:

відсутність насичення магнітного кола і втрати в сталі;

симетричне розташування обмоток статора;

незалежність індуктивності розсіювання від положення ротора в просторі [5].

Схематична конструкція синхронного генератора з магнітами постійного типу представлена на Рис. 2.2, де будова статора ідентична

іншим трифазним машина змінного струму, а на роторі розташовано вал з постійними магнітами.

Струм обмотки статора створює обертове магнітне поле статора, магнітні полюси якого приваблюють протилежні магнітні полюси ротора. Це призводить до виникнення моменту, який викликає обертання ротора за полем статора [9-10].

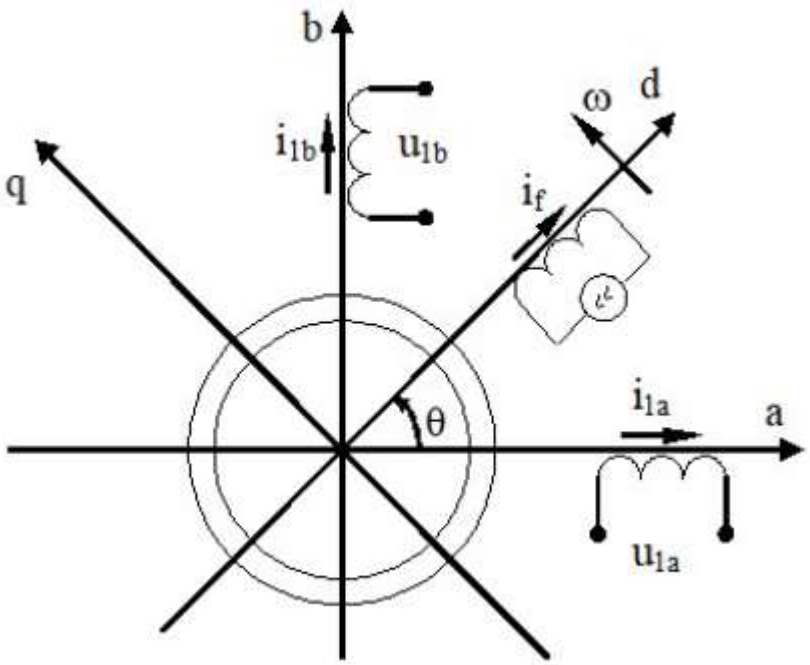

Рисунок 2.2 – Модель синхронного генератора на постійних магнітах

Де на рис.2.2 (a–b), (d–q) –системи координат статора та ротора;

u_a, u_b, i_a,i_b – проекції векторів напруги та струму статора,

i_f– струм від постійних магнітів;

θ, ω – кутове положення та кутова швидкість ротора відносно статора,

Узагальнене рівняння електричної рівноваги статорного кола у формі закону Кірхгофа можна виразити так:

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{R}_1\mathbf{i}_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \qquad (2.6)$$

де вектор потокозчеплення статора можна описати виразом:

$$\Psi_1 = \begin{pmatrix} \Psi_{1a} \\ \Psi_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + L_m i_f \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix}, \tag{2.7}$$

Виконавши підстановку рівняння 2.7 в рівняння 2.6 отримаємо згідно закону рівняння рівноваги у матричному виді:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_{1a}}{dt} \\ \frac{di_{1b}}{dt} \end{pmatrix} + L_m i_f \begin{pmatrix} -\omega\sin\theta \\ \omega\cos\theta \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

У випадку, коли повний момент інерції механічної системи J є константою, можна отримати динамічну модель синхронного генератора:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}\left[k_M\left(-i_{1a}\sin\theta + i_{1b}\cos\theta\right) - M_c\right] \\ \dot{i}_{1a} &= L_1^{-1}\left(u_{1a} - R_1 i_{1a} + L_m i_f \omega \sin\theta\right) \\ \dot{i}_{1b} &= L_1^{-1}\left(u_{1b} - R_1 i_{1b} - L_m i_f \omega \cos\theta\right) \end{aligned} \tag{2.9}$$

Для розробленої математична модель неявнополюсного синхронного генератора з використанням збудження від постійних магнітів в системі координат ротора (d–q).

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}\left(\frac{3}{2} p_n L_m i_f i_{1q} - M_c\right) \\ \dot{i}_{1d} &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1d} + p_n \omega i_{1q} + \frac{1}{L_1} u_{1d} \\ \dot{i}_{1q} &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1d} - p_n \omega i_{1d} - \frac{L_m}{L_1} i_f p_n \omega + \frac{1}{L_1} u_{1q} \end{aligned} \tag{2.10}$$

Графічне зображення, яке показує взаємозв'язок у просторі між нерухомою системою a-b та рухомою ортогональною системою d-q наведена на рис. 2.3.

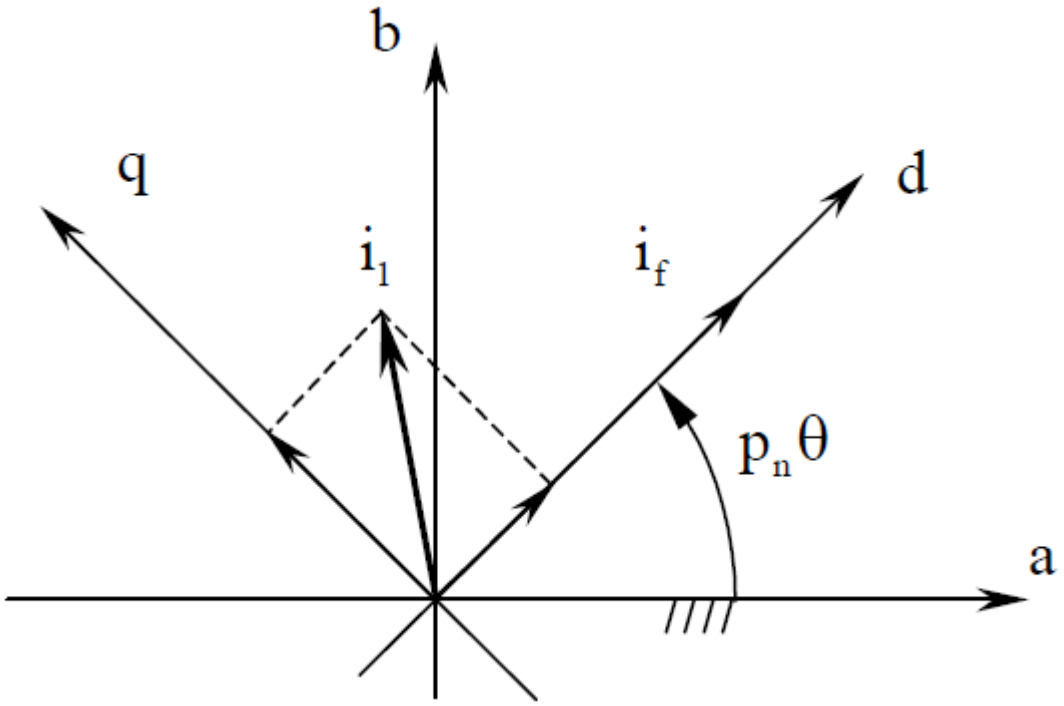

Рисунок 2.3 – Перетворення системи нерухомих координат до системи рухомих координат ротора синхронного генератора

Модель синхронного генератора (СГ) в координатах ротора виявляє наступні характеристики:

- Рівняння СГ, сформульовані в системі координат ротора, не залежать від кутового положення, але є нелінійними;

- Момент СГ представляє собою лінійну функцію квадратурної компоненти струму статора iq та за умов відсутності явнополюсності не залежить від id;

- Модуль вектора потокозчеплення ротора Ψf лінійно залежить від прямої компоненти струму статора id.

2.3 Формалізація завдання регулювання швидкості вітрового генератора

Керування перетворювачем на генераторній стороні спрямоване на досягнення максимальної потужності з наявної енергії вітру. Для максимізації вихідної потужності вітру при фіксованому куті нахилу β, кутова швидкість ω турбіни повинна змінюватися відповідно до зміни швидкості вітру, забезпечуючи стале відношення швидкостей λ.

Припустимо, що виконуються наступні умови:

1. Параметри моделі електромеханічного об'єкта є відомими і постійними, при цьому момент турбіни ТМ є постійним (змінюється повільно) і обмеженим.

2. Задана траєкторія зміни кутової швидкості ω* обмежена функцією часу з відомою обмеженою першою похідною.

Розробимо алгоритм управління кутовою швидкістю СД, який забезпечить:

1) Асимптотичне досягнення заданих траєкторій руху;

2) Створення каскадної структури системи кутовою швидкістю з внутрішнім контуром регулювання моменту та зовнішнім контуром регулювання кутової швидкості.

На рис. 2.4 наведена структурна схема векторного керування швидкості системи автоматичного керування

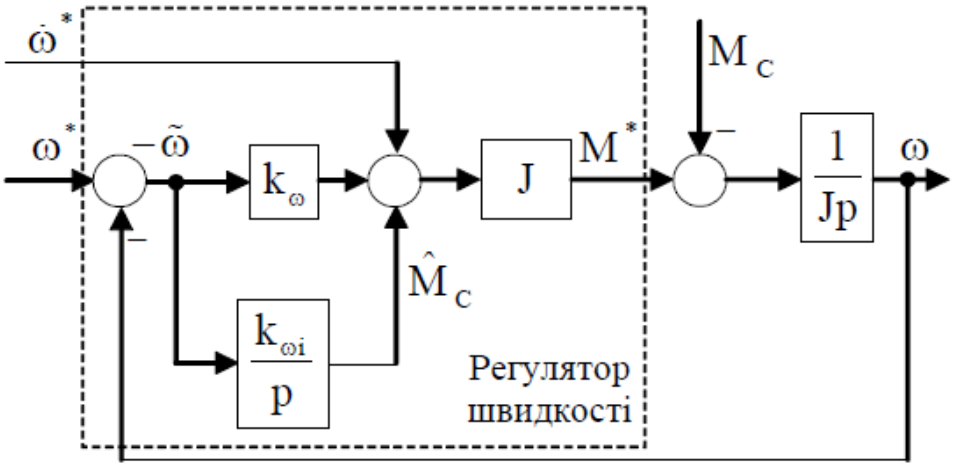

Рисунок 2.4. - Структурна схема векторного керування швидкості системи автоматичного керування

Простий метод управління передбачає перерахунок значень заданих струмів у (d-q) координатах у трифазні струми СГПМ за допомогою кута перетворення:

$$i_a^* = I_d^* \sin(\theta_{re}) + I_q^* \cos(\theta_{re})$$

$$i_b^* = I_d^* \sin(\theta_{re} - 2\pi / 3) + I_q^* (\theta_{re} - 2\pi / 3) \qquad (2.11)$$

$$i_c^* = I_d^* \sin(\theta_{re} + 2\pi / 3) + I_q^* (\theta_{re} + 2\pi / 3)$$

де кут перетворення має вид:

$$\theta_{re} = \frac{p}{2}\theta_r \qquad (2.12)$$

де p - кількість пар полюсів синхронного генератора з ПМ.

Розрахункові трифазні струми i*a, i*b, i*c СГПМ порівнюються з вимірюваними струмами ia, ib, ic генератора для обчислення помилок струму iae, ibe, ice. Ці обчислені помилки струму множаться на коефіцієнт K, і отримані сигнали порівнюються з фіксованою частотою 10 кГц трикутної форми для генерації стрибкоподібних імпульсів для шести біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) генераторного перетворювача.

Ще один метод управління струмами базується на рівняннях електричної рівноваги статорного кола, використовуючи рівняння (2.10) за умови векторного керування, де струм i_d=0 приймають вигляд:

$$\dot{i}_{1d} = p_n \omega i_{1q} + \frac{1}{L_1} u_{1d};$$

$$\dot{i}_{1q} = -\frac{R_1}{L_1} i_{1q} - \frac{L_m}{L_1} i_f p_n \omega + \frac{1}{L_1} u_{1q}. \qquad (2.13)$$

З використанням рівняння (2.13) можна створити алгоритм управління струмами синхронного генератора, який має вид:

$$u_{1d} = -L_1 p_n \omega i_q - k_i \tilde{i}_{1d} - x_d;$$
$$u_{1q} = R_1 i_{1q}^* + L_m p_n \omega i_f - k_i \tilde{i}_{1q} + p_n L_1 i_d \omega + L_1 \dot{i}_q^* + x_q. \quad (2.14)$$

При застосуванні векторного управління рівняння похибок відпрацювання струмів матимуть вигляд:

$$\dot{\tilde{i}}_{1d} = -\frac{R_1}{L_1} \tilde{i}_{1d} - k_i \tilde{i}_d + x_d;$$
$$\dot{\tilde{i}}_{1q} = -\frac{R_1}{L_1} \tilde{i}_{1q} - \tilde{i}_{1d} p_n \omega - k_i \tilde{i}_{1q} + x_q. \quad (2.15)$$

Отже, система рівнянь (2.15), яка описує послідовне з'єднання підсистеми регулювання продольного струму id, яка є асимптотично стійкою, і підсистеми регулювання поперечного струму iq, яка стає асимптотично стійкою після затухання похибки відпрацювання продольного струму id.

Управління перетворювачем на стороні навантаження здійснюється з метою утримання напруги та частоти навантаження, а також регулювання активної та реактивної потужності.

Напруги трифазного навантаження представлені у вигляді:

$$v_{La}^*(t) = V_m \sin(2\pi ft)$$
$$v_{Lb}^*(t) = V_m \sin(2\pi ft - 120^o) \quad (2.16)$$
$$v_{Lc}^*(t) = V_m \sin(2\pi ft + 120^o)$$

Дві напруги фази навантаження La v та Lb v визначаються за допомогою двох датчиків напруги, а напруга третьої фази Lc v розраховується на основі виміряних напруг фаз з урахуванням того, що сума збалансованих трифазних напруг завжди дорівнює нулю.

Задану та фактичну напругу для кожної фази порівнюються окремо в момент часу t, можна визначити за формулою:

$$v_{Laer}(t) = v^*_{La}(t) - v_{La}(t)$$
$$v_{Lber}(t) = v^*_{Lb}(t) - v_{Lb}(t) \qquad (2.17)$$
$$v_{Lcer}(t) = v^*_{Lc}(t) - v_{Lc}(t)$$

Похибки напруг для кожної фази задаються в налаштуваннях пропорційно-інтегральному контролера для отримання необхідних струмів інвертора момент часу t визначаються наступним чином:

$$i^*_{LSIa}(t) = i^*_{LSIa}(t-1) + K_p\{v_{Laer}(t) - v_{Laer}(t-1)\} + K_i v_{Laer}(t)$$
$$i^*_{LSIb}(t) = i^*_{LSIb}(t-1) + K_p\{v_{Lber}(t) - v_{Lber}(t-1)\} + K_i v_{Lber}(t) \qquad (2.18)$$
$$i^*_{LSIc}(t) = i^*_{LSIc}(t-1) + K_p\{v_{Lcer}(t) - v_{Laer}(t-1)\} + K_i v_{Lcer}(t)$$

Задані трифазні струми інвертора порівнюються з виміряними та отримані похибки піддаються підсиленню за допомогою коефіцієнта посилення K. Подальше введення похибок струму відбувається через генератор широкосмугової модуляції (ШІМ) із фіксованою частотою трикутної форми (10 кГц) та амплітудою 1 для створення сигналів управління для трьох виводів інвертора.

Висновки з Розділу:

1. У даному частині була вирішена задача визначення характеристик вітроколеса, представлена математична модель його роботи. Розглянуті ключові параметри вітряної турбіни, такі як коефіцієнт потужності, швидкохідність, максимальний коефіцієнт використання енергії вітру, та встановлені залежності для визначення потужності турбіни. Отримані рівняння турбіни будуть використані при моделюванні системи генерації в середовищі Matlab.

2. Розроблено математичну модель неявнополюсного синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів для моделювання механічної частини системи генерації. Відповідні рівняння записано в стаціонарній системі координат статора (a–b) та системі координат ротора (d–q).

3. Задача траєкторії швидкості вітрового генератора для керування швидкістю СГПМ сформульована за допомогою основних формул КПД турбіни та швидкості кінця лопаті.

4. Для забезпечення величини напруги навантаження, його частоти та керування активною і реактивною потужністю розроблено та описано систему керування перетворювачем на стороні навантаження.

3 РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ГЕНЕРАТОРА

3.1 Аналіз робочих параметрів вітрогенераторної системи

Синхронний генератор з постійними магнітами (СГПМ) керується за допомогою перетворювача частоти, що включає зовнішній контур регулювання швидкості та внутрішній контур регулювання струму по осях d і q.

Вплив вітру зі швидкістю V на турбіну передається через взаємодію з лопатями, створюючи момент обертання на валу, який з'єднує турбіну з синхронним генератором з постійними магнітами (СГПМ) через редуктор. Генератор перетворює механічну енергію в електричну, що подається на автономний перетворювач, результатом чого є напруги abc u і струми статора abc i.

Зазвичай схема інвертора використовує трифазну мостову схему, відому як "Міст Ларіонова", яка включає шість повністю керованих ключів (IGBT транзисторів). Ці транзистори дозволяють протікання струму в прямому напрямку, а їхні діоди забезпечують зворотній потік струму.

В контурі регулювання струму, здійсненому через канал зворотного зв'язку, обробляються сигнали від датчиків струму, які вимірюють струм кожної фази двигуна. Ці сигнали порівнюються з вхідними сигналами на струм, які постають від контролера швидкості.

Регулятор швидкості отримує необхідне значення швидкості на вході. Сигнал швидкості з генератора віднімається від сигналу завдання через зворотний зв'язок, і регульований сигнал надсилається на регулятор швидкості.

Електрична енергія з автономного перетворювача передається через ланку постійного струму, де вона накопичується за допомогою конденсатора великої потужності і подається на активний інвертор напруги

(АІН), який працює в зворотному режимі. Напруга Udc знімається з ланки постійного струму і передається в систему керування.

Для формування і регулювання вихідної напруги застосовується принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Схеми АІН і АВ виконані за допомогою повністю керованих напівпровідникових силових ключів.

Також присутній регулятор напруги Udc для підтримання напруги на рівні 600 (В).

Регулювання в першій зоні здійснюється за допомогою таблиці точок максимальної потужності, що дозволяє отримувати максимальну електричну потужність в цій зоні при будь-яких швидкостях вітру.

Регулювання в другій зоні виконується за допомогою зменшення швидкості обертання турбіни, керування якою реалізовано блоком завдання траєкторії швидкості.

Система управління автономного інвертора напруги включає наступні вхідні сигнали: швидкість обертання генератора (ω), задана швидкість обертання (ω*), та струми I на фазах статора abc .

Регулятор швидкості базується на ПІ-регуляторі, який отримує на вхід обчислену помилку між заданою і діючою швидкістю обертання (ω). Вихідним сигналом регулятора є крутний момент, оскільки потік ротора в СГПМ є постійним і дорівнює ψ*, і обчислюється значення струму q і.

Блок qd / abc виконує dq-перетворення складових обертового поля в abc-фазні сигнали управління змінного струму.

Регулятор струму базується на порівнянні сигналів управління з наявними сигналами струмів статора. Керуючі сигнали представляють собою симетричну трифазну систему струмів, що пропорційна бажаним значенням відповідних фазних струмів генератора.

Розглянемо систему управління автономного випрямляча:

На вхід системи надходять сигнали: задана напруга постійного струму (U*dc), напруга ланки постійного струму (Udc), задана частота (f) і струми мережі (I a,b,c).

Принцип роботи системи управління АВ схожий на АІН із пропорційно-інтегральним регулятором швидкості, блоком dq / abc, який виконує dq-перетворення, і релейним регулятором струму.

3.2 Обґрунтування потужності вітрового генератора

Серед параметрів вітрового генератора зазвичай вказується розрахункова швидкість вітру, яка представляє собою ту швидкість, при якій потужність вітрового генератора досягає свого номінального значення.

Вітрогенератори із меншою розрахунковою швидкістю вітру виробляють більше електроенергії за однакових умов. Проте надто низька розрахункова швидкість вітру призводить до значного збільшення розмірів та вартості вітрового генератора, що може стати економічно невигідним.

В роботі розглядаються декілька вітрових генераторів із розрахунковою швидкістю вітру в межах 7.5 до 8.5 м/с. Діапазон значень був обумовлений з міркувань оптимальної вартості виробленої ними електроенергії.

Таблиця 3.1 – Технічні параметри вітрових генераторів

Вітровий генератор	№1	№2	№3
Встановлена потужність, кВт	1	2	1
Діаметр вітротурбіни, м	2.3	2.5	3.25
Розрахункова швидкість вітру, м/с	10	12	8

Згідно з таблицею, обрання більшої розрахункової швидкості дозволило використовувати більш компактні вітротурбіни для

вітрогенераторів №2 і №3. При цьому можна припустити, що ціни на вказані вітрогенератори будуть відповідно №1 - 3200 у.о., №2 - 2100 у.о., №3 - 3900 у.о. На перший погляд може здатися, що вітрогенератори №2 і №3 мають значну вигоду перед №1. Один з них має еквівалентну потужність і вартість значно нижче, інший трошки дорожчий, але з потужністю вдвічі більше.

Для об'єктивного порівняння запропонованих вітрогенераторів необхідно оцінити вартість виробленої ними електроенергії. Для наочності розглянемо графік (Рис. 3.1), на якому подані залежності потужності вітрогенераторів від швидкості вітру.

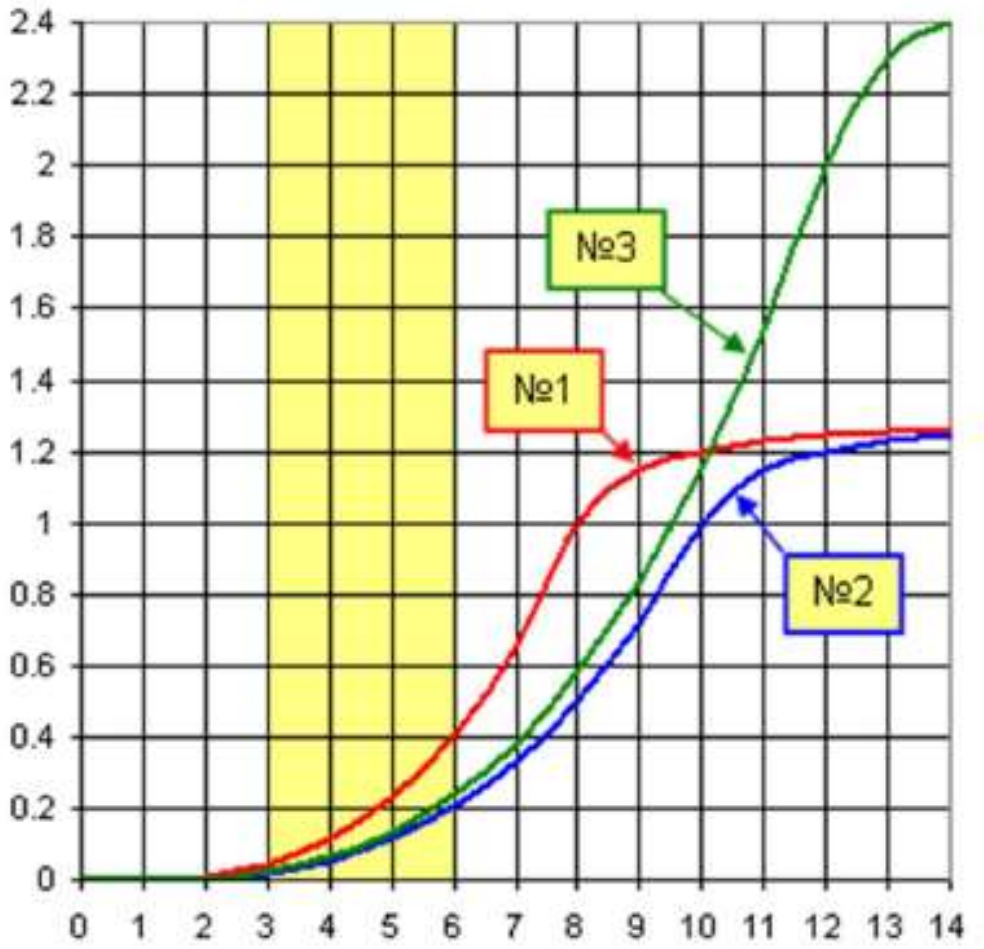

Рисунок 3.1 – Залежність потужності генераторів від швидкості вітру

Очевидно, що в діапазоні найбільш поширених швидкостей вітру

(3…6 м/с) вітрогенератор №1 виробляє помітно вищу потужність, ніж його конкуренти. Вітрогенератор №3 перевершує його лише при швидкостях вітру понад 10 м/с, який виявляються досить рідко і нетривало.

Для більш ефективного порівняння було розраховано вартість електроенергії, яку кожен з генераторів виробляє протягом 20 років при різних середніх швидкостях вітру. У врахуванні враховувалась тільки вартість самого вітрогенератора. Результати представлені в табл. 3.2.

Вітрогенертор		№1	№2	№3
Вартість, у.е.		3200	2100	3900
$V_{сер} = 3 м/с$	Генерація за місяць, кВт · год	74,48	37,24	44,1
	Генерація за 15 років, кВт · год	17875,2	8937,6	10584
	Вартість ел. енергії, у.о/кВт·год	0,1715	0,2254	0,35378
$V_{сер} = 4 м/с$	Генерація за місяць, кВт · год	155,82	82,32	97,02
	Генерація за 15 років, кВт · год	37396,8	19756,8	23284,8
	Вартість ел. енергії, у.о/кВт·год	0,08232	0,10192	0,16072
$V_{сер} = 5 м/с$	Генерація за місяць, кВт · год	249,9	142,1	172,48
	Генерація за 15 років, кВт · год	59976	34104	41395,2
	Вартість ел. енергії, у.о/кВт·год	0,05096	0,0588	0,09016
$V_{сер} = 6 м/с$	Генерація за місяць, кВт · год	345,94	217,56	274,4
	Генерація за 15 років, кВт · год	83025,6	52214,4	65856
	Вартість ел. енергії, у.о/кВт·год	0,03724	0,03822	0,05684

Аналіз показує, що вітрогенератор №1 є більш вигідним у всіх розглянутих вітрових умовах. Розрив більший для областей з низькими швидкостями вітру і трошки менший для вітряних місць. Водночас, найменш вигідним виявився найпотужніший вітрогенератор №3.

Головний висновок полягає в тому, що при порівнянні різних вітрогенераторів важливо звертати увагу не лише на заявлену номінальну потужність, а й на діаметр вітротурбіни. Очікувана вироблена енергія вітрогенератора за однакових умов пропорційна квадрату діаметра його турбіни. [21]

Таким чином, характеристики вітроенергетичної установки залежать від обсягу необхідної електроенергії та вітроенергетичного потенціалу місця, де планується встановлення вітрогенератора. Вітровий потенціал місцевості визначається середньорічною швидкістю вітру.

Обсяг електроенергії, який може вироблятися вітряком, залежить від площі поверхні лопатей, яку охоплює вітер. Ця площа визначається діаметром (або радіусом) вітроколеса. Взаємозв'язок між швидкістю вітру і електричною потужністю, що виробляється вітрогенератором, відображається формулою (2.1), яку ми розглядали раніше.

На підставі аналізу даних та отриманих висновків, а також ознайомившись з різними вітрогенераторами, обираємо для моделювання в середовищі Matlab вітрову установку типу RE2R 150. Вітрогенератор характеризується номінальною потужністю 5.8 кВт, функціонує при початковій швидкості вітру 1 м/с, досягаючи номінальної потужності при середній швидкості вітру 9.5 м/с та виробляє приблизно 5700 Вт.

3.3 Розрахунок робочих характеристик синхронного генератора

У цьому розділі ми проведемо обчислення основних параметрів генератора [22], щоб подальше його вивчення за допомогою моделі в середовищі Matlab стало можливим. Спочатку ми розрахуємо номінальні значення механічних та електричних параметрів генератора. Після цього надамо основні вихідні дані для моделювання вітряної установки.

Початкові дані для обчислення параметрів синхронного генератора

наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 3.3 – Паспортні дані синхронного генератора

Параметри генератора	Розмірність	Значення
Число пар полюсів	Кіл.	3
Синхронна частота обертання	об / хв	1000
Номінальний момент	Н * м	53
Номінальне діюче значення фазного струму статора	Н * м	9,4
Номінальна частота напруги статора	Гц	50
Номінальна потужність	кВт	5,7
Номінальна лінійна напруга статора	В	370
Напруга холостого ходу	В	356
Момент інерції	кг * $м^2$	0,05
Критичний момент	Н * м	105
Коефіцієнт потужності		0,99
Коефіцієнт корисної дії		0,93

З Довідникової літератури визначимо технічні параметри СГ Активний опір статора, R1' = 0.547 в.о; реактивний опір розсіяння в статорі, x1' =1.01 в.о.; індуктивність у намагнічуючому контурі, Lm = 0.0069 в.о.; Індуктивність розсіювання в статорі, L_1= 0.0032 в.о.; індуктивний опір магнітопроводу статору, x_μ = 2,71 в.о.

Визначимо кутову частоту статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад / с)}$$

Значення швидкості на холостому ходу СГ:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{3} = 104.6 \text{ (рад/ с)}$$

Розрахуємо діючі значення фазної напруги статора СГ:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{369}{\sqrt{3}} = 213 \text{(В)}$$

Розрахуємо амплітудні значення фазних напруги і струму статора СГ:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 213 = 301 \text{(В)}$$
$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 9.3 = 13 \text{(А)}$$

Розрахуємо значення потокозчеплення статора для режиму холостого ходу:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{301}{314} = 0.95 \text{ (Вб)}$$

Визначаємо індуктивність статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.0032 + 0.00691 = 0.01011 \text{(Гн)}$$

Коефіцієнт моменту розраховуємо за виразом:

$$k_m = \frac{M_н}{I_н} = \frac{52.5}{9.3} = 5.6$$

Струм викликаний постійними магнітами визначимо через коефіцієнт моменту:

$$i_f = \frac{k_m}{\psi_f} = \frac{5.6}{0.95} = 5.94(A)$$

В ході аналізу були проведені розрахунки номінальних механічних та електричних характеристик синхронного генератора RE2R. Отримані значення параметрів генератора будуть використані для подальших досліджень, зокрема, у математичному моделюванні, яке розглядається у розділі 4.

Висновки з розділу:

1. Розроблена функціональна схема системи генерування, де детально описано функції кожного елемента.

2. У даному розділі вибрано та розраховано ключові параметри синхронного генератора типу RE2R з потужністю 5.7 кВт. Ці значення будуть використовані для подальших досліджень розробленої системи.

3. Обґрунтовуючи вибір номінальної швидкості вітру для вітрогенераторної установки, проведено розрахунок виробленої енергії для трьох різних номінальних значень швидкості вітру. Встановлено, що установки, розраховані на меншу швидкість вітру, генерують більший об'єм електричної енергії при меншій потужності генератора, що забезпечує мінімальну вартість виробленої ними електроенергії.

Таким чином, під час вибору вітрогенератора важливо звертати увагу не лише на заявлену номінальну потужність, а й на діаметр вітротурбіни.

4 РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЮВАНН ШВИДКОСТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

У цьому розділі планується провести детальне дослідження системи керування автономною вітровою установкою. Моделювання виконано в середовищі Matlab Simulink..

Система керування вітрогенераторною установкою включає три основні частини: модель вітрової турбіни, яка отримує сигнал вітру, модель синхронного генератора та системи векторного його управління, і модель системи автономного живлення, що об'єднує ланку постійного струму перетворювача синхронного генератора з системою резервного живлення на акумуляторних батареях, а також ланку постійного струму перетворювача, що формує змінну напругу для споживачів.

Система керування реагує на зміну швидкості вітру та функціонує у двох режимах. Перший режим - це оптимальна робота при швидкостях вітру, що підтримують номінальну вихідну потужність турбіни. Другий - робота системи при швидкостях вітру, коли генерується потужність турбіни вище номінальної (як вказано у Розділі 3, це швидкості вищі за 9.5 (м/с)).

Послідовність тестування включає наступні етапи:

1. Дослідження роботи системи керування вітрогенератором при змінній швидкості вітру V = var та забезпеченні номінальної потужності турбіни.

2. Дослідження роботи системи керування вітрогенератором при змінній швидкості вітру V = var, при якій потужність турбіни перевищує номінальну.

3. Дослідження роботи системи керування вітрогенератором при постійній швидкості вітру V = const, яка дорівнює 9.5 (м/с), та симуляція навантаження від споживача.

4. Вивчення функціонування системи управління вітрогенератором

при змінній швидкості вітру V = var, що становить (м/с), і симуляції навантаження від споживача.

5. Аналіз роботи системи управління вітрогенератором за постійної швидкості вітру V = const, яка складає 5 (м/с), 9.5 (м/с), 1.5 (м/с), а також відтворення навантаження від споживача.

6. Експеримент з функціонування системи управління вітрогенератором за постійної швидкості вітру V = const, включаючи симуляцію навантаження від споживача.

Оскільки діаметр турбіни значно перевищує діаметр ротора генератора, момент інерції лопатей стає важливим при обчисленні загального моменту інерції обертаючих мас вітроенергетичної установки.

Рівняння, яке зв'язує масу та довжину лопаті вітроенергетичної установки, має наступний вигляд:

$$m = 0.11 \cdot L^{2.62} = 0.11 \cdot 2.9^{2.62} = 1.85\ (кг)$$

Відповідно момент інерції однієї лопаті та всієї турбіни визначається наступним чином:

$$J_{лоп} = k_j \cdot m \cdot L^2 = 0.18 \cdot 1.85 \cdot 2.9^2 = 2.8$$

$$J_m = i \cdot J_{лоп} = 3 \cdot 2.8 = 8.4$$

Отже, загальний момент системи ВЕУ визначається так:

$$J_{\Sigma} = J_m + J_{ред} + J_{ген} = 8.4 + 0.032 + 0.04 = 8.472$$

З метою полегшення моделювання, значення моменту інерції зменшено в 100 разів.

Дослідимо роботу системи генерування в режимі максимальної потужності при швидкостях вітру нижче розрахованої номінальної.

Дослідження проводилося при різних значеннях вхідної швидкості вітру, а саме [5 (м/с), 9.5 (м/с), 1.5 (м/с)]. Параметри вхідної швидкості вітру та траєкторія кутової швидкості турбіни представлені на Рис. 4.1.

Графік вказує, що початкова швидкість вітру складає 5 (м/с), збільшується до 9.5 (м/с) протягом 3 секунд, що є номінальною для турбіни, а в 6 секунд швидкість зменшується до 1.5 (м/с).

Видно, як турбіна плавно адаптується до необхідної швидкості для генерування номінальної потужності.

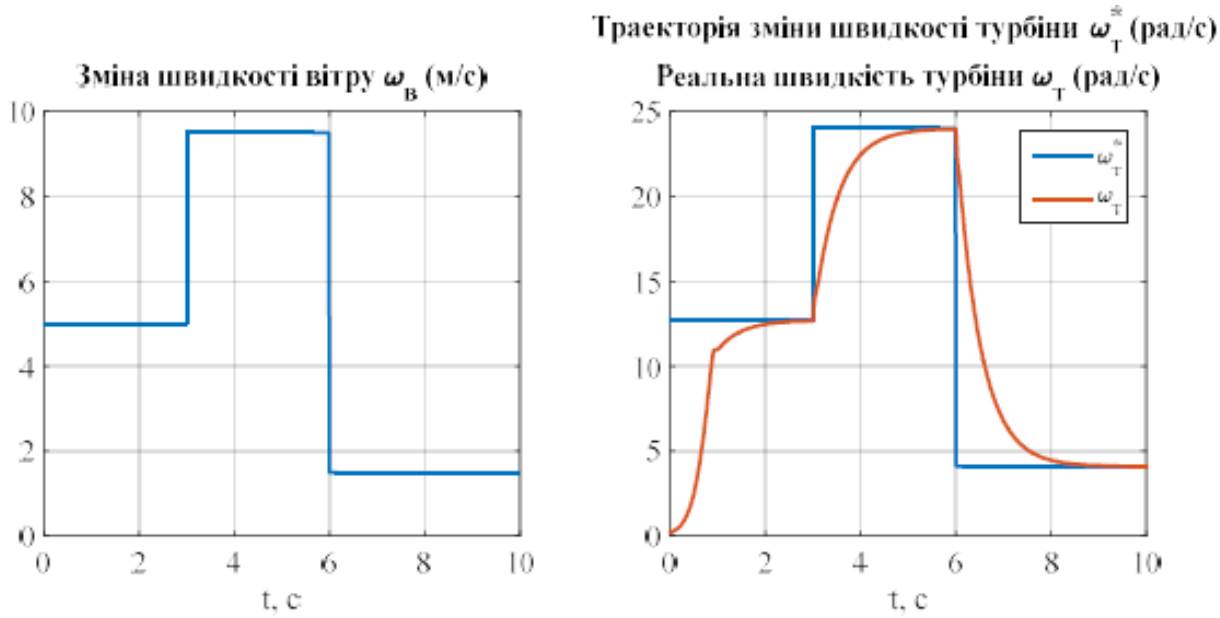

Рисунок 4.1 – Швидкості вітру та віторової турбіни

З аналізу графіка потужності турбіни можна визначити, що при низьких швидкостях вітру турбіна наближається до максимально можливої потужності, яку вона може виробити.

На швидкості 9.6 (м/с) потужність приближається до номінальної величини 5.7 (кВт). На швидкостях нижче 9.5 (м/с) генерується максимально можлива потужність: при 5 (м/с) вона становить 768 (Вт), а

при 1.5 (м/с) – 20 (Вт). Завдяки редуктору, момент турбіни передається на вал генератора для дальшого виведення згенерованої енергії в електричну мережу.

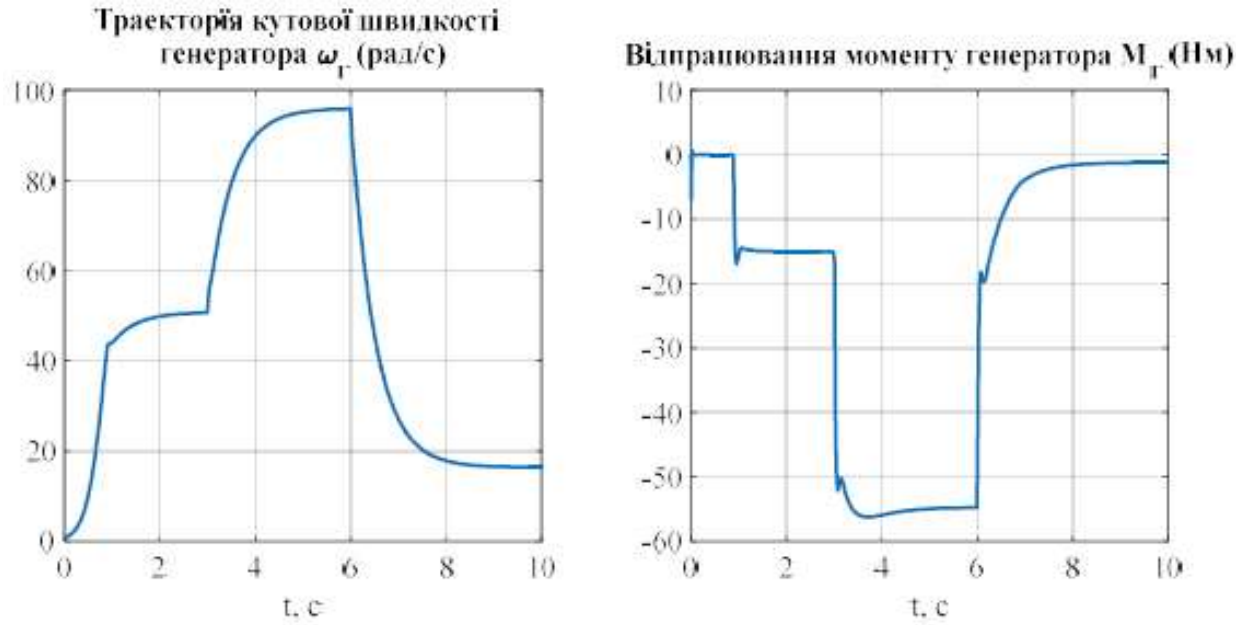

Рисунок 4.2 – Зміна швидкості обертання лопаті та моменту генератора

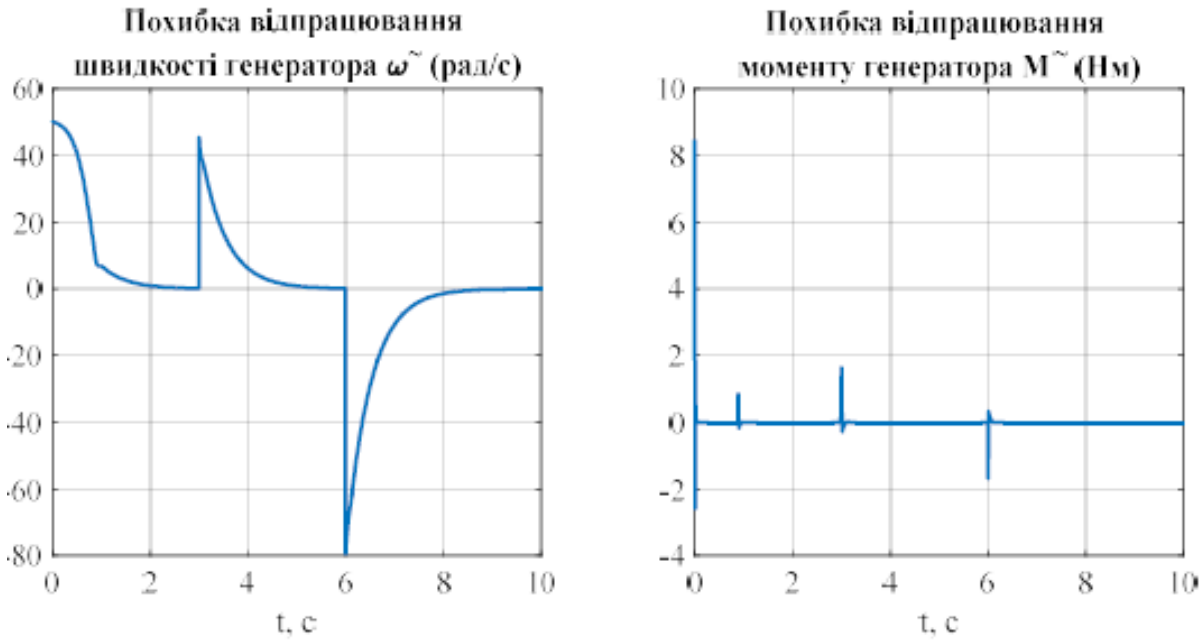

Рисунок 4.3 – Похибка відпрацювання системою автоматичного

керування заданих значень швидкості та моменту генератора

Траєкторія зміни швидкості генератора коригується за допомогою динамічних похибок 42 (рад/с) та 82 (рад/с). Важливо відзначити, що в системі відсутня статична похибка за швидкістю.

Максимальний момент генератора в цьому дослідженні становить 55.75 (Н·м) і не перевищує критичного значення. Додатково, момент генератора має динамічну похибку, яка не перевищує 2 (Н·м).

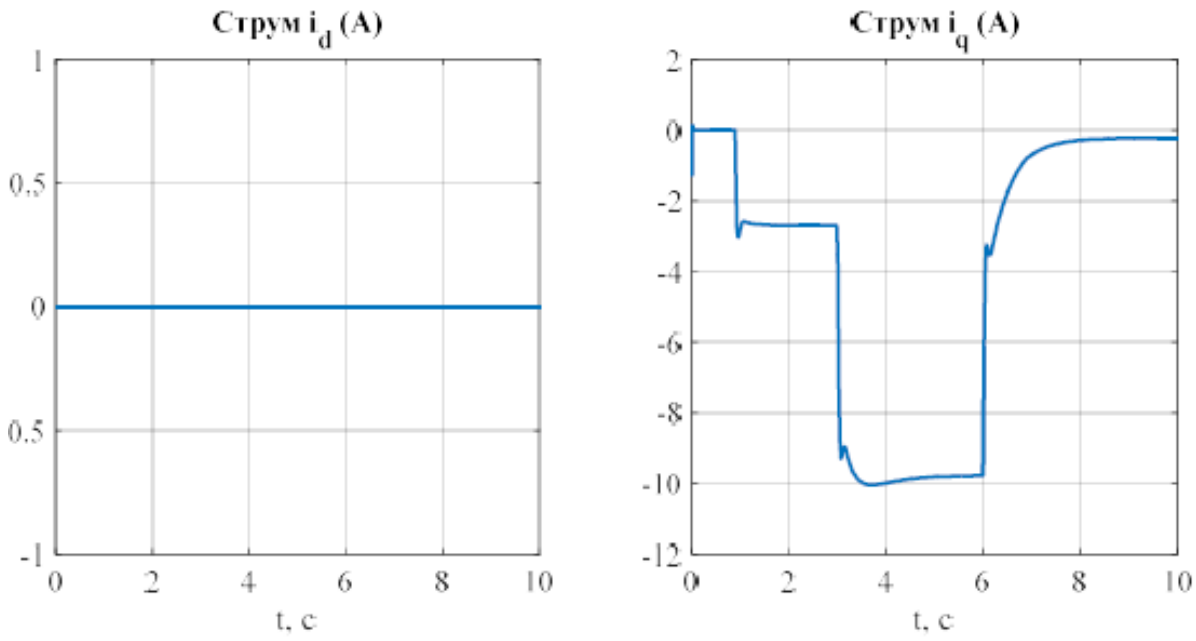

Рисунок 4.4 – Динаміка продольного i_d та поперечного струмів i_q

Виявляється, що значення струму не перевищує максимального під час гальмування турбіни, і тому виникає помилка по струму, яка залишається в межах 0.5 (А).

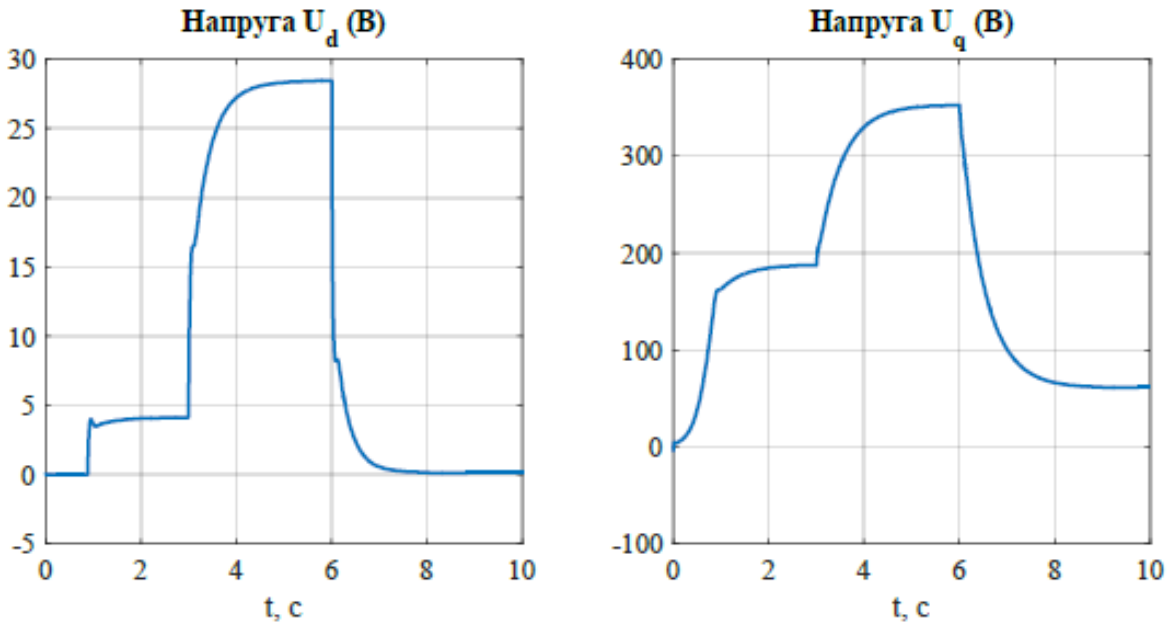

Рисунок 4.5 – Зміна складових напруги в ортогональній системі d- q

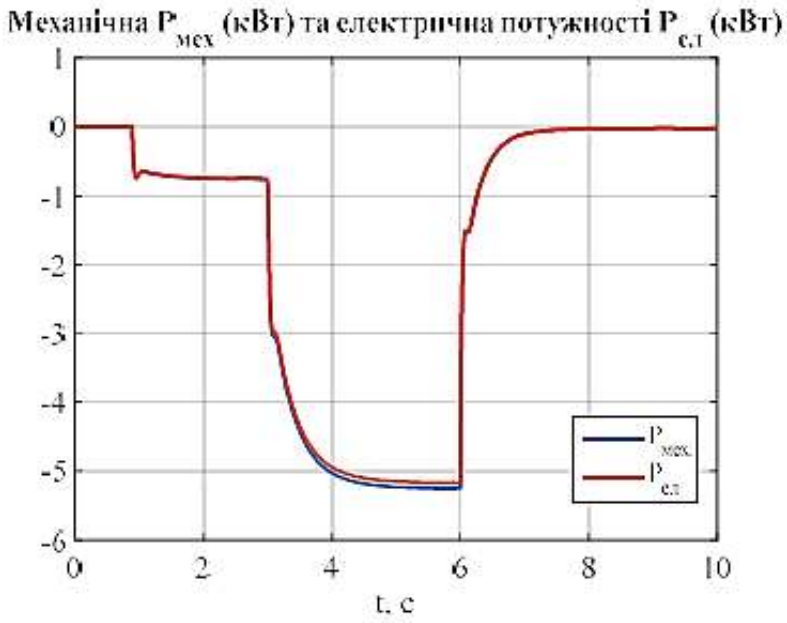

Рисунок 4.6 – Динаміка потужності на валу та статорі вітрового генератора

На основі графіку потужностей генератора видно, що на низьких швидкостях втрати в генераторі зростають, і система використовує максимально можливу потужність вітру. З іншого боку, чим вища швидкість вітру, тим більші втрати в електричній машині. Проте система керування

успішно підтримує ККД турбіни на максимальному рівні.

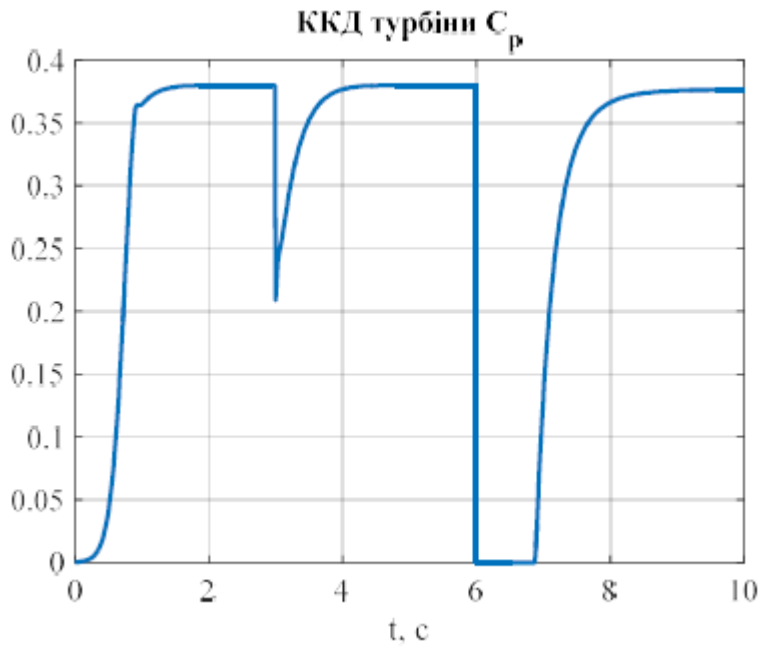

Рисунок 4.7 – Динаміка ККД турбіни в режимі підтримання максимальної генерації.

Дослідимо функціонування системи при обмеженні потужності в умовах високих швидкостей вітру. Режим роботи вивчався при різних швидкостях вітру, зокрема [9.5 (м/с), 10.5 (м/с), 13.5 (м/с), 16.5 (м/с), 19.5 (м/с)].

У даному експерименті завдання швидкості вітру визначалося рівномірним зростанням відносно початкової номінальної швидкості, при якій досягається максимальна ефективність турбіни.

Графіки вхідної швидкості вітру та траєкторії кутової швидкості турбіни подані на рис. 4.8.

Початкова швидкість вітру становила 9.5 м/с і протягом періоду часу 0.5 с зростала до 10.5 м/с, а далі на моментах часу t = [3 с, 5 с, 7 с] збільшувалася на 3 м/с.

Спостерігаючи за системою, відзначаємо, що турбіна плавно адаптується до необхідної швидкості для оптимального вироблення енергії

в умовах високих швидкостей вітру.

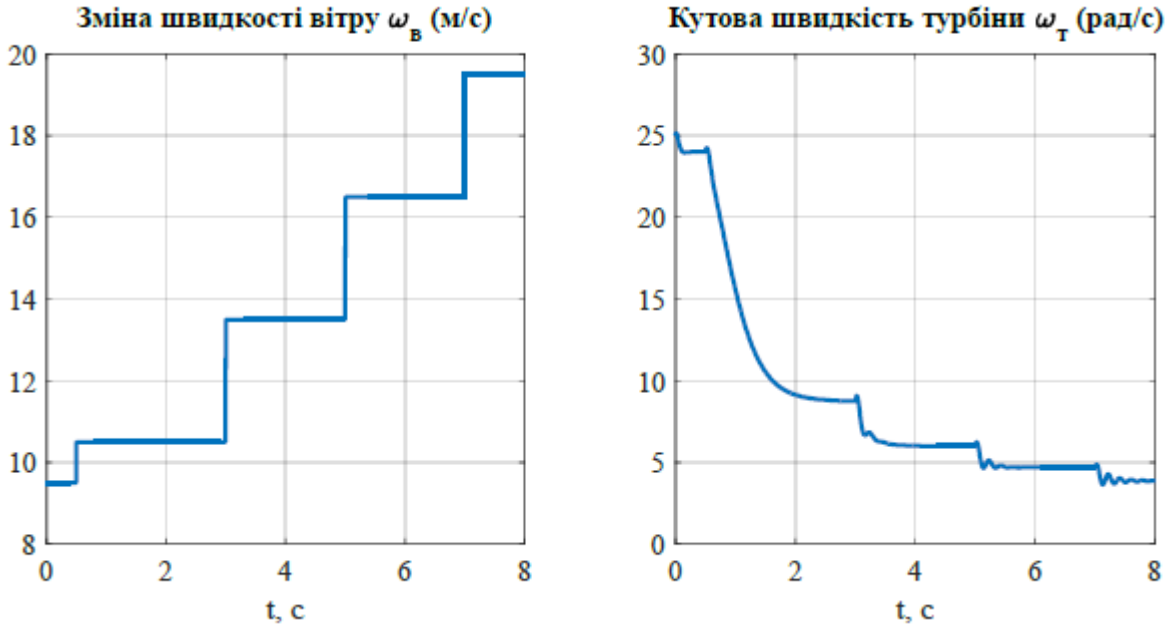

Рисунок 4.8 – Зміна швидкості вітру та турбіни

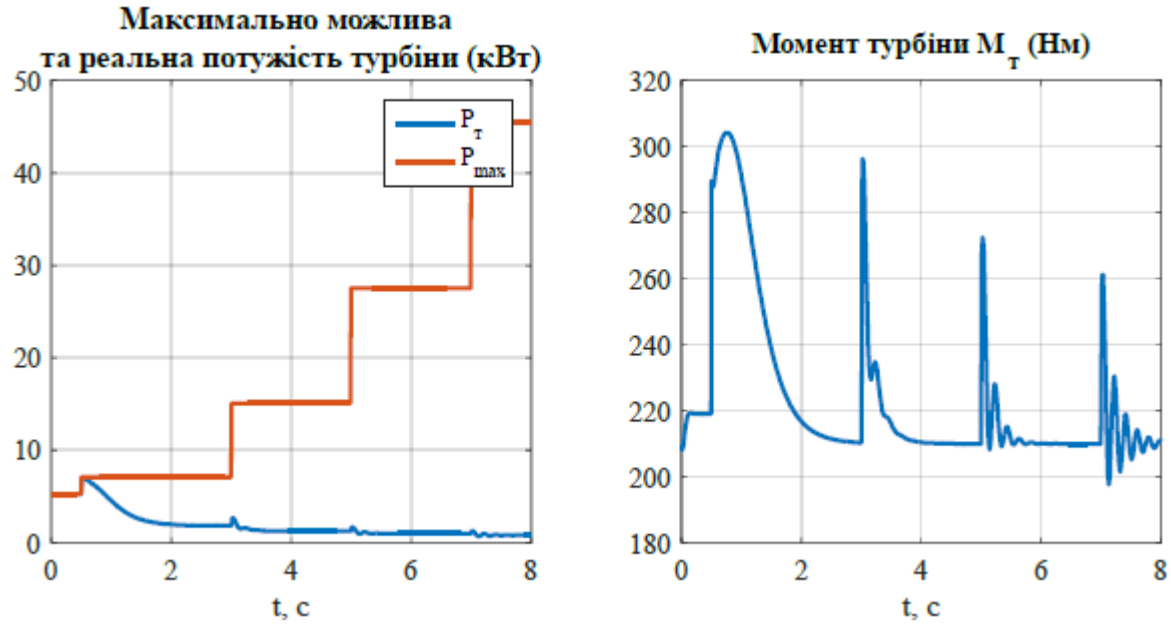

Рисунок 4.9 – Динамічні перехідні процеси потужності турбіни та моменту на її валу

З аналізу графіка потужності турбіни випливає, що при швидкостях вітру, що перевищують номінальні значення, система керування знижує швидкість турбіни, при цьому момент М також зменшується.

Зі збільшенням швидкості вітру графік Рт віддаляється від максимально можливої потужності, яку може надати турбіна. Це свідчить про те, що система керування переводить турбіну з режиму максимальної ефективності в режим зниженої ефективності.

На швидкості 9.5 (м/с) потужність наближається до номінальної, досягаючи 5,7 (кВт), а при вищих швидкостях отримуються наступні значення потужності: 10.5 (м/с) – 2.9 (кВт), 13,6 (м/с) – 11,3 (кВт), 16,5 (м/с) – менше 0,89 (кВт), 19,5 (м/с) – 0,7 (кВт).

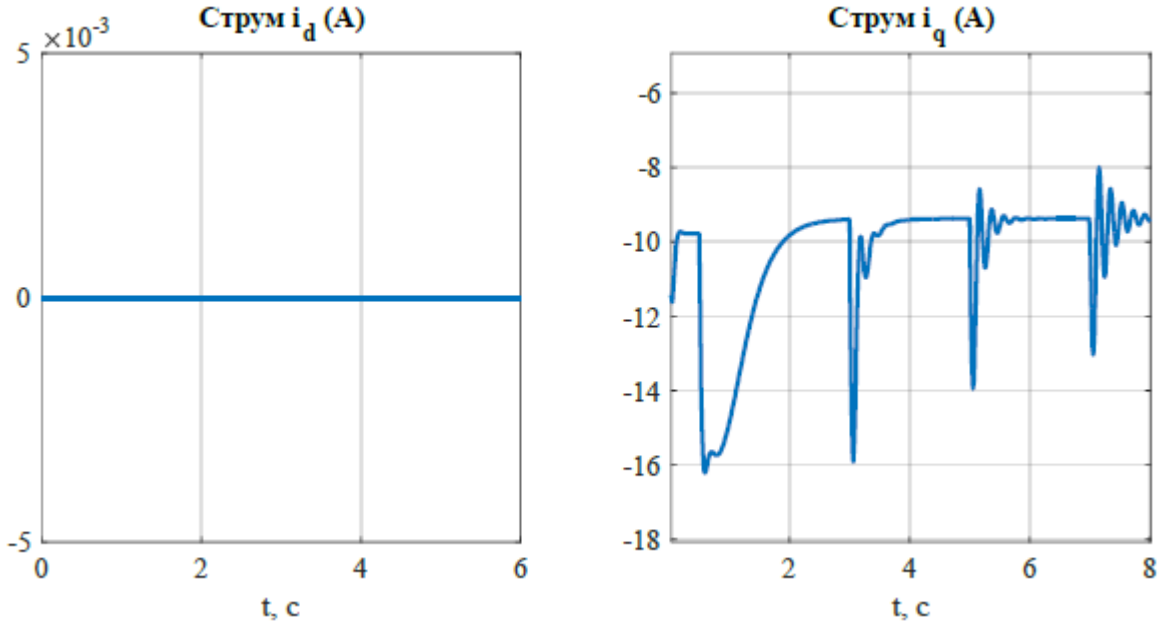

Рисунок 4.10 – Динаміка продольного i_d та поперечного струмів i_q при обмежені потужності турбіни

На основі графіків складових струмів d і та q рис. 4.10 очевидно, що i_d=0, оскільки введено припущення про керування струмом вздовж осі d. За будь-якої швидкості вітру струм iq не перевищує свого номінального значення.

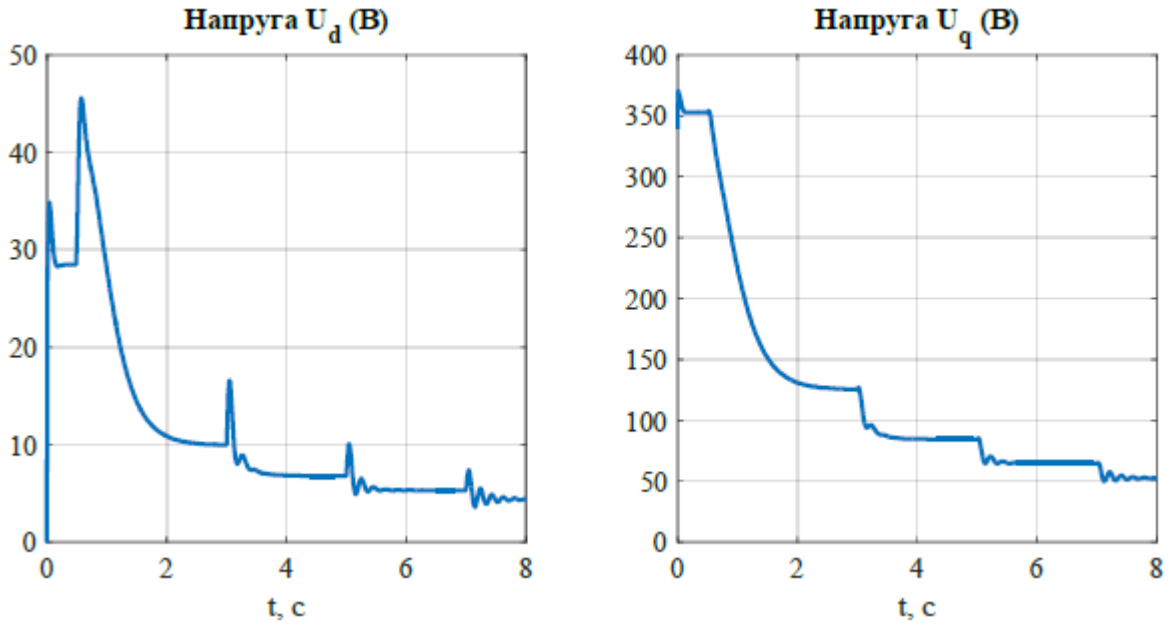

Рис. 4.11 - Зміна складових напруги в ортогональній системі d- q при обмежені потужності турбіни

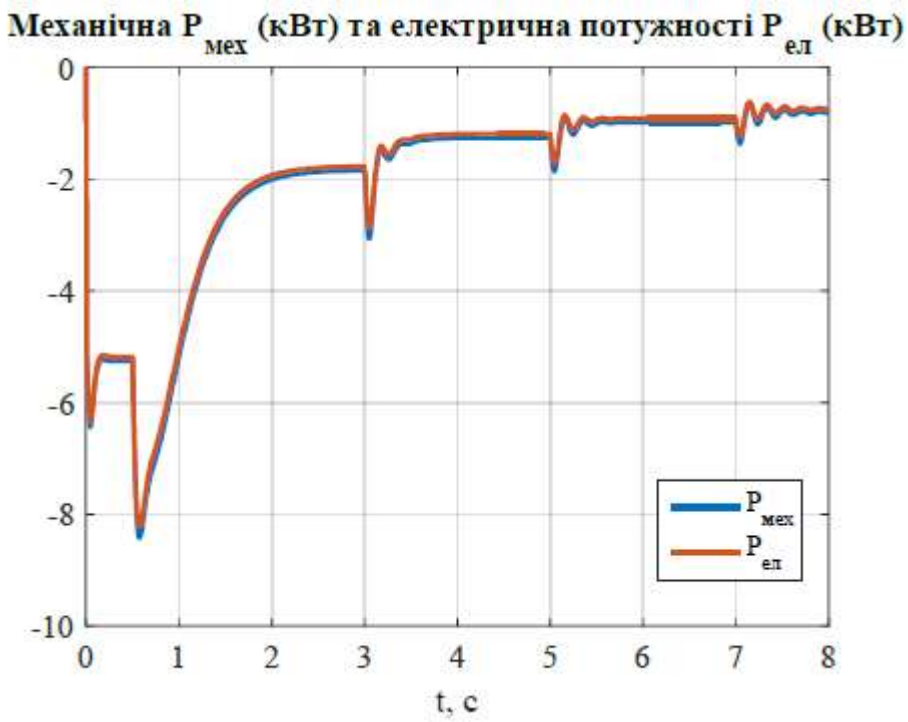

Рисунок 4.12 – Динаміка потужності на валу та статорі вітрового генератора при обмежені потужності турбіни

Аналізуючи графік потужності генератора, можна відзначити, що на великих швидкостях вітру ККД генератора залишається стабільним та

дорівнює номінальному значенню лише в точці номінальної потужності, де швидкість вітру Vw = 9.6(м / с).

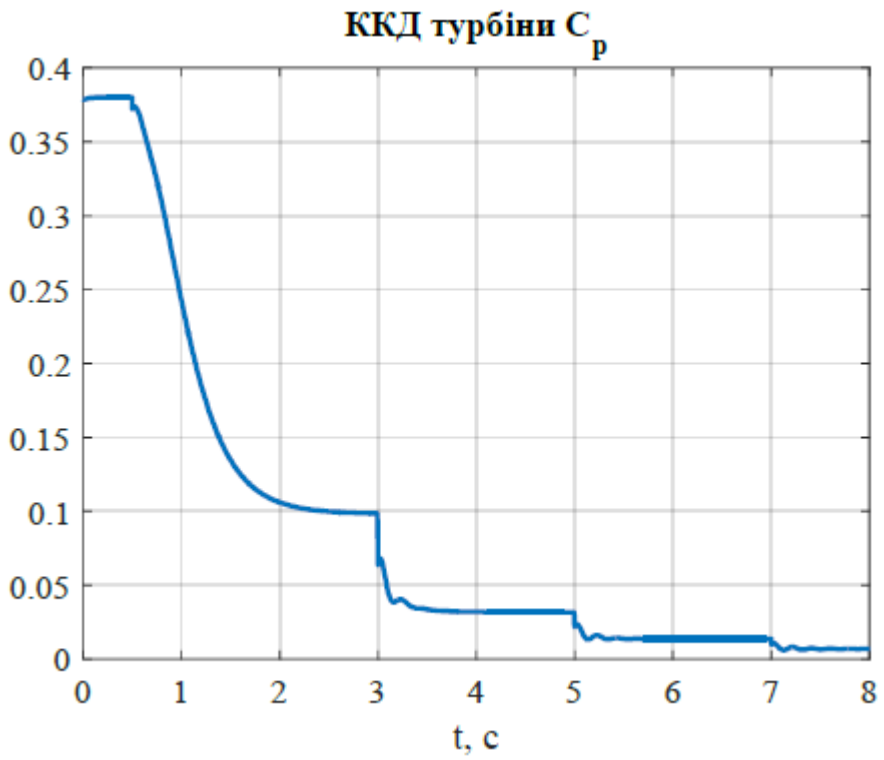

Рисунок 4.13 – Динаміка ККД турбіни в режимі обмеження потужності турбіни

1. На вітряних швидкостях, перевищуючи номінальні значення, система керування автоматично зменшує обертову швидкість турбіни, при цьому спостерігається зниження моменту Мт.

2. Графік потужності Рт, прогресуючи із зростанням швидкості вітру, віддаляється від максимально можливої потужності турбіни. Цей процес свідчить про те, що система керування переводить турбіну з режиму максимальної ефективності в режим обмеженої потужності.

3. Момент генератора становить Мг = 52.5 (Н · м) та залишається в межах номінального значення. Струм генератора також не перевищує номінальне значення 9.3 (А).

4. Графік потужності генератора вказує, що при великих швидкостях вітру ККД генератора залишається на стабільному рівні, але система використовує потужність турбіни, яку може ефективно керувати.

5. Таким чином, система керування виходить із точки максимальної ефективності турбіни і переходить у режим, де система може ще контролювати кутову швидкість турбіни, але вже не отримує максимальної потужності вітра та турбіни. Регулювання вихідної потужності в режимі контрольованої потужності здійснюється шляхом регулювання швидкості турбіни так, щоб Мт не перевищував номінальний момент генератора Мг.

6. При цьому ККД турбіни Ср зменшується при збільшенні швидкості вітру (Рис.4.13). Що вища швидкість вітру, тим менше ефективна продуктивність системи генерації, але при цьому підтримується номінальний момент генератора.

Висновки до розділу

Шляхом математичного моделювання було проведено аналіз функціонування створеної системи векторного керування автономною генераційною системою, базованою на синхронному генераторі з постійними магнітами. З результатів досліджень визначено наступне:

При вивченні режиму максимальної потужності при низьких швидкостях вітру система функціонує у режимі регулювання швидкості для ефективного використання вітряної енергії, щоб забезпечити максимальну ефективність турбіни. Коефіцієнт корисної дії турбіни Cp досягає максимального значення при низьких швидкостях вітру. Зі зростанням швидкості вітру продуктивність системи генерації зменшується, але потужність наближається до номінальної.

В режимі обмеження потужності при високих швидкостях вітру система керування виходить із точки максимальної ефективності турбіни і переходить в режим, коли система може контролювати кутову швидкість турбіни, але не отримує максимальної потужності вітра та турбіни.

При дослідженні системи генерації при постійній швидкості вітру та зміні навантаження система забезпечує максимальний збір потужності від вітрового потоку шляхом регулювання швидкості турбіни в залежності від швидкості вітру.

Під час дослідження системи генерації при навантаженні система успішно стабілізує напругу в ланці постійного струму (Udc), накопичуючи та зберігаючи невикористану вітрову потужність або передаючи її споживачу за необхідності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У цій роботі було вирішено актуальне завдання тестування алгоритмів векторного керування автономною системою генерування, що ґрунтується на синхронному генераторі з постійними магнітами, при зміні швидкості. Під час роботи отримано наступні результати:

1. Для аналізу переваг і недоліків кожного типу, а також вибору оптимального електромагнітного приводу для стабілізації і регулювання параметрів, відповідальних за якість виробленої електричної енергії, розглядались різновиди машин, що використовуються в вітрових електростанціях. Синхронний генератор з постійними магнітами був обраний через відсутність втрат на збудженні та відсутність змінного щіткового контакту, що призводить до вищого коефіцієнта корисної дії. Також він відзначається низькими втратами на тертя, радіочастотними перешкодами і шумами, а його співвідношення маси до продуктивності є мінімальним серед інших машин.

Були розглянуті функціональні схеми вітрогенераторів, і вибрана система, яка включає в себе перетворювач та інвертор напруги, ланку постійного струму та акумуляторну батарею.

З численних методів керування для приводів на базі синхронного генератора з постійними магнітами було обрано полеорієнтоване керування через його низькі обчислювальні витрати та меншу амплітуду пульсацій при роботі в статичних режимах. Це є важливим в контексті нашої системи генерації.

Для подальшого моделювання системи була створена математична модель вітроколеса та модель синхронного генератора з постійними магнітами в системі координат ротора (d–q).

Задача швидкості турбіни була описана відповідними формулами ККД турбіни та швидкості кінця лопаті. Також була визначена головна

задача керування перетворювачем на стороні генератора. Синтезовано лінійний пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор швидкості, описана система керування струмами синхронного генератора та система керування перетворювачем на стороні навантаження.

За допомогою математичного моделювання було перевірено функціонування розробленої системи векторного керування автономною системою генерування на основі СГПМ. Встановлено, що при низьких швидкостях вітру система працює в режимі регулювання швидкості для максимального використання енергії вітру та забезпечення максимальної ефективності турбіни. ККД турбіни досягає максимального значення. На високих швидкостях вітру система керування виходить з точки максимальної ефективності турбіни і переходить в режим, коли можна контролювати кутову швидкість турбіни, але максимум потужності вітра та турбіни не досягається. Це відкриває можливості для оптимізації регулювання на основі завдань і обмежень негативного моменту синхронного генератора з постійними магнітами, а також для регулювання в різних зонах - для отримання максимально можливої потужності та для обмеження потужності в різних умовах роботи системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hall D. Renewable Energy. Power for a Sustainable Future. / D. Hall // Oxford Unit. Press, 1996. – 478 pp.

2. Huang Xueliang, Liu Zhiren, Zhu Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines.

3. Transactions of china eletrotechnical society, 2010, 25(4): 142–149. Fu Xunbo, Guo Jindong, Zhao Dongli, et al. Characteristics and simulation model of direct–drive wind power system. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 1–5.

4. J. F. Gieras and M. Wing, Permanent Magnet Motor Technology – Design and Application, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.

5. M. Kimura, H. Koharagi, K. Imaie, S. Dodo, H. Arita and K. Tsubouchi, “A permanent magnet synchronous generator with variable speed input for cogeneration system,” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, vol. 3, 28 Jan.–1 Feb. 2001, pp. 1419 – 1424.

6. T.F. Chan, L.L. Lai, Yan Lie–Tong, "Performance of a three–phase AC generator with inset NdFeB permanent–magnet rotor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.19, no.1, pp. 88– 94, March 2004.

7. T.F. Chan, W. Wang, L.L. Lai, "Analysis and performance of a permanent–magnet synchronous generator.

8. K. Amei, Y. Takayasu, T. Ohji and M. Sakui, “A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit,” Proc. of the Power Conversion Conference, PCC Osaka 2002, vol. 3,

9. 2–5 April 2002, pp. 1447 – 1452.

10. V. Lavanya, N.A. Gounden and P.M. Rao, “A Simple Controller using Line Commutated Inverter with Maximum Power Tracking for WindDriven Grid–Connected Permanent Magnet Synchronous Generators,” in

Proc. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06,12–15 Dec. 2006, pp.1 – 6.

11. S. M. Dehghan, M. Mohamadian and A.Y. Varjani, “A New VariableSpeed Wind Energy Conversion System Using Permanent–Magnet Synchronous Generator and Z –Source Inverter,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol.

12. 24, no. 3, pp. 714 – 724, September, 2009.

13. M. E. Haque, M. Negnevitsky and K.M. Muttaqi, “A Novel Control Strategy for a Variable–Speed Wind Turbine With a Permanent–Magnet Synchronous Generator,” IEEE Trans. Industry Appl., vol. 46, no. 1, pp. 331 – 339, Jan. /Feb. 2010.

14. Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind–Energy–Conversion Applications”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.53, No.2, April 2006.

15. S. M. Dehghan, M. Mohamadian and A.Y. Varjani, “A New VariableSpeed Wind Energy Conversion System Using Permanent–Magnet Synchronous Generator and Z –Source Inverter,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 24, no. 3, pp. 714 – 724, September, 2009.

16. Vlastimil Šantín, “Model of wind power plant with asynchronous generator in Simulink platform”, May 2011, Železná Ruda–Špiák, University of West Bohemia, Czech Republic.

17. Junfei Chen, Hongbin Wu, Ming Sun, Weinan Jiang, Liang Cai, and CaiyunGuo, ”Modeling and Simulation of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator”, in IEEE PES ISGT ASIA 2012

18. Mirvetra:Понижена розрахункова швидкість вітру. Режим доступу: http://mirvetra.com.ua/ratedspeed.html

19. Vemgroup: Каталог СГПМ. Режим доступу:https://www.vemgroup.com/fileadmin/content/pdf/Download/Kataloge/Kataloge/pm_en.pdf

20. Energotrade: Каталог автономних інверторів. Режим

доступу:https://energotrade.su/invertory/invertor-6kw.htm

21. Altshop: Акумуляторна батарея. Режим доступу:https://altshop.in.ua/products/akkumulyatornaya-batareya-ad12-150

22. Tme: Каталог резисторів. Режим доступу:https://www.tme.eu/en/details/ahp250w-50rf/resistors-200w-andmore/sr-passives/

23. Xebike: Контролер BMS. Режим доступу: https://xebike.com/product/kontroller-zashhity-akkumulyatora-3-2v-3-7v-bms-pcmlitij-li-ion-lipo-lifepo4-3-204s-100-1000a-12v-750v/

24. Voltmarket: Зарядний пристрій для АКБ. Режим доступу: https://voltmarket.ua/zaryadnye-ustroistva/logicpower/

ДОДАТКИ

Додаток А

ЗАХОДИ ПО ОХОРОНІ ПРАЦІ

А.1.Заходи з охорони праці

Всі правові питання охорони праці у нашій країні вирішуються на основі Конституції. Законодавство по правовій охороні праці регламентуї режим робочого часу і відпочинку робочиз та службовців. Нормальна тривалість робочого часу для всих працюючих не повинна перевищувати 41 год за неділю як при п'ятиденному та і шестиденному робочому тижню. Робочим і служачим у віці від 16 до 18 років встановлюїться 36-годинний робочий тиждень. Така ж тривалість робого тижня для робітників, зайнятих на роботах з шкідливими умовами праці. При роботі у нічний час з 22 по 6 год тривалість зміни зменшуїться на 1 год, за виключенням робочих та служачих для яких вже передбачено зкорочений робочий час. Застосування надурочних робіт допускаїться тільки у вилючних випадках і з дозволу місцевого профсоюзного комітету. Для кожного працюючого загальна кількість надурочних робіт не повинна перевищувати 120 год на протязі року. На роботах у тяжких та шкідливх умовах і на об'їктах робіт, відносячихся до категорії підвищенної небезпеки забороняїться використовувати осіб молоших 18 років.

Серед заходів, направленних на створення раціональних умов трудового процесу важливу роль граї режим праці і відпочинку.

Організаційні заходи по небезпечній експлуатації електроустановок включають: оператине обслуговування діючих електроустановок, що в свою чергу передбачаї періодичні і позачергові огляди системи електропостачання і електроприймачів; контроль та облік електроенергії; оперативні перемикання у електричних мережах, забезпечуючі безперебійне живлення електроенергіїю. Оперативне обслуговування електроустановок проводиться інженерно-технічним, черговим і оперативно-ремонтним електротехнічним персоналом

Обов'язки закріплені за даною електроустановкою чергового персоноалу визначаються місцевими інструкціями, у яких повинні бути вилкладені також основні конкретні міри по електронебезпеці і пожежній небезпеці стосовно до експлуатуїмого електрообладнання.

Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як однією особою так і декількома. Чисельність персоналу для кожнлго цеху, ділянки, підстанції визначаїться головним енергетиком підприїмства.

При обслуговуванні електроустановок напругою вище 1000 В старший у зміні (бригадир) або черговий повинні мати кваліфікаційну групу по ТБ не нижче, IV, а у електроустановках до 1000 В - не нижче групи III.

Організаційними заходами по забезпеченню небезпечного виробництва

робіт у електроустановках являються слідуючі: оформлення роботи нарядом чи розпорядженням, оформлення у наряді допуска робочих до роботи, надзор під час роботи, оформлення у наряді перерв у роботі і переходів бригади на інше робоче місце, оформлення у наряді закінчення робіт, закриття наряду.

Оформлення наряду потрібно на ті роботи, які проводяться з повним або частковим зняттям напруги з ремонтуїмої електроустановки, а також на ті роботи, винуїмі без зняття напруги поблизу або безпосередньо на струмоведучих частинах, що знаходяться під напругою. Ці роботи потребують, як правило, підготовки робочого місця і виконання ряду технічних заходів по забезпеченню безпечного їх виконання.

Організаційними заходами по забезпеченню безпеки робіт, що проводяться, в порядку поточної експлуатації, являються слідуючі:

- складання переліку робіт особою, відальною за електрогосподарство підрпиїмства, з урахуванням конкретних місцевих умов виробництва, які затвержуї главний механік підприїмства;
- визначення необхідності тої чи іншої роботи виконувачем робіт і можливості її безпечного виконання.

Ці роботи вважаються постійно дозволенними і не потребують оформлення будь-якими додатковими розпорядженнями.

У електроустановках підприємства застосовуються слідуючі технічні захисні міри:

1. Малі напруги. Якщо номінальна напруга електроустановки не перевищуї тривалодопустимої напруги дотику, то даже одночасний дотик людини з стумоведучими частинами різних фаз чи полюсів буде

безпечним. У технологічному процесі комбінату застосовуються ручний електроінструмет з номінальною напругою 42 В. Однофазний дотик до струмоведучих частин, а також, дотик до опинившогося під напругою корпусу, наваіть не заземленному буде безпечним, так як струм через людину при дотику до фази визначаїться опором ізоляції та малою напругою. Однак у сирих приміщеннях де опір людини може бути значно знижений, струм протікаючий через людину, при дотику до двох виводів чи фаз буде невідпускаючим. Тому приймаються інші міри захисту.

2. Електричний розділ мереж. Розгалуджена мережа великої довжини маї значну їмність і малий активний опір ізоляції відносно землі, а отже струм замикання у такій мережі може бути значним. Тому однофазний дотик у мережі навіть з ізольованою нейтраллю являїться, безумовно, небезпечним. Якщо їдину сильно розгалуджену мережу з великою їмністю і малим опором ізоляції розділити на ряд невеликих мереж такої ж напруги, які будуть мати незначну їмність і високим опором ізоляції, небезпека різко знизиться. Так, струм через людину, що доторкнулася до однії фази буде визначатися високим опором фаз відносно землі , якщо у мережах напругою 380 В $|Z| > 63$ кОм, а опір кола людини Rch = 1.0 кОм, струм через людину не перевище 10 мА.

Звичайно електричне розділення мереж виконуїться шляхом під'їднання окремих електроприймачів через роздільний трансформатор, живлячийся від основної мережі.

Велику небезпеку представляї можливість продовження роботи електроустановки при глухому замиканні на землю, так як людина, що доторкнулася до справної фази, попадаї під лінійну напругу. Щоб уникнути небезпеки необхідно постійно проводити контроль ізоляції.

3. Контроль і профілактика ушкоджень ізоляції. Приймально-здаточні випробування проводяться при вводі у їксплуатацію нових та вийшовших із ремонту електроустановок. Об'їм і норми приймально-здаточних випробувань регламентуються ПУЭ, ПТЭ і ПТБ.

Періодичний контроль ізоляції - вимірювання її опору при прийомкі електроустановки після монтажу, періодично у строки встановлюїмі Правилами, або ж у випадку виявлення дифектів. Вимірювання згідно [8] повинно проводитися на вимкненій установці. Вимірюїться опір ізоляції

кожної фази на кожній ділянці між двома послідовно встановленними апаратами захисту чи за останнім захисним апаратом. Норми на опір ізоляції регламентовані у [8]. Для отримання уявлення про опір ізоляції всіїї мережі необхідно, заміри проводити під робочою напругою. Такий контроль можливий тільки для мереж з ізольованої нейтраллю.

4. Захист від випадкового дотику. Щоб виключити можливість дотику і небезпечного наближення до струмоведучих частин на розглядуванному підприїмстві застосовуються огородження, розташування стумоведучих частин на недоступній висоті, а також електричні блокіровки. Огорождження застосовуються як сплошні так і сітчасті. Електричні блокіровки виконуються на кінцевих вимикачх або герконах. Для захисту від доторкання до частин нормально чи випадково виявимшимся під напругою застосовуїться також двойна ізоляція - електрична ізоляція, складаючася із робочої і додаткової. Додаткова ізоляція, передбачаїться додатково до робочої для захисту від ураження електричним струмом. Найбільш просто вона виконуїться покриттям ручок та певних місць корпусів електрообладнання шаром електроізоляційного матеріалу та використанням ізолюючих ручок.

5. Захисне заземлення. Застосовання захисного заземлення у мережі з заземленою нейтраллю напругою до 1000 В неефективно, так як даже при глухому замиканні на землю струм не залеже від опору заземлення і змешнням останнього зростаї. Тому захисне заземлення застосовуїться у внутрішньоцеховій мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю. Захисне заземлення на розглядуванному підприїмстві виконуїться у вигляді замкненого контуру навколо ГЗП.

6. Занулення. Застосовуїться у чотирипроводних мережах до 1000 В з заземленною нейтраллю. Для зменшення тривалості режиму замикання на корпус прокладаїться нульовий провід. з'їднуючийся з заземленною нейтраллю джерела та повторними заземлювачами. При зануленні корпуси

електрообладнання з'їднуються не з заземлювачами а з нульовим проводом. Занулення перетворюї замикання на корпус електроприймача у однофазне коротке замикання у результаті чого спрацьовуї МТЗ і селективно відмикаї ушкоджену ділянку мережі.

А.2. Розрахунок заземлення

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можіть попасти під напругу, повинні бути заземлені

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів - Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю 27 А. Для цехового обладнання використовується заземлення. Цехові підстанції отримуюють живлення від 2 кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Грунт – чорнозем, другий кліматичний район.

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжини з'єднувальної полоси з розміщенням на плані.

Визначаєм ному на опір заземлення $R_з^н$.

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_з \le \frac{125}{I_з} = \frac{125}{27} = 4{,}63 \text{ Ом;}$$

Згідно ПУЕ , так як сумарна потужність токоприймачів більш 100 кВА то $R_з$ повен бути не більше 4 Ом. Приймаємо $R_з$ = 4 Ом.

Визначаємо розрахунковий питомий опір грунту:

$$\rho_р = \rho_{табл} \cdot \psi = 220 \cdot 1{,}3 = 286 \text{ Ом·м}$$

де $\rho_{табл}$ - табличне значення, для чернозему $\rho_{табл}$ =220 Ом·м табл. 7.14 [5]; ψ - підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів ψ =1,2...1,4.

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$R_o = 0{,}366 \frac{\rho_{розр}}{l}\left(lg\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}lg\frac{4t+l}{4t-l}\right) =$$

$$= 0.366\frac{286}{5}\left(lg\frac{2\cdot 5}{2.5} + \frac{1}{2}lg\frac{4\cdot 3+5}{4\cdot 3-5}\right) = 15{,}4 \ Ом;$$

l – довжина заземлювача, приймаємо 5 м; Δ – діаметр заземлювача (приймаємо стержні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0.5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м};$$

де h – глибина прокладки полос (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Приймаємо електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану і знаходимо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_e}{R_з^н \cdot \eta_o} = \frac{15{,}4}{4.054} = 6.9 \approx 7 \text{шт.}$$

Де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для a/l=4/5=0.8, η_o =0,54 по рис. 7.5[5].

Де а= 4 м – відстань між електродами згідно ПУЕ.

Довжина горизонтальної з'єднувальної полоси:

$$l_n = 1.05a \cdot n = 1.05 \cdot 4 \cdot 7 = 29.4 \text{ м.}$$

Опір полоси з урахуванням екранування:

$$R_n = 0.366 \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0.366 \frac{286}{29.4 \cdot 0.51} lg \frac{2 \cdot 29.5^2}{0.01 \cdot 7} = 28{,}38 \text{ Ом};$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної полоси шириною b = 10 мм та товщиною 5 мм

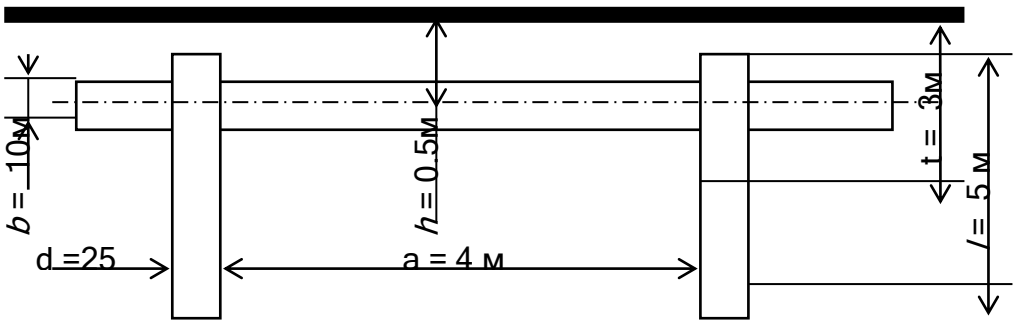

Рис. А.1. Схема прокладки заземлення

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної полоси:

$$R_{тр} = \frac{R_n \cdot R_з^н}{R_n \cdot R_з^н} = \frac{28{,}38 \cdot 4}{28{,}38 - 4} = 7{,}94 \text{ Ом.}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{тр} \cdot \eta_o} = \frac{15{,}4}{7{,}94 \cdot 0{,}59} = 3{,}6 \approx 4 \text{ штук.}$$

Проводимо перевірку опору зземлювача і порівнюємо отримане значення з нормуємим:

$$R_з = \frac{1}{\frac{1}{R_{тр}} + \frac{1}{R_п}} = \frac{1}{\frac{1}{7{,}94} + \frac{1}{28{,}38}} = 3.98 \text{ Ом.}$$

$$3{,}78 < 4 \text{ Ом}$$