

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики  
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проект**

**на здобуття ступеня бакалавра**

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,  
електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Портативний вітрогенератор на базі синхронної машини

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ЕП-71

(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Постоялко Дмитро Андрійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н., Король С.В.

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

Консультант \_\_\_\_\_

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

Рецензент \_\_\_\_\_ старший викладач Котлярова Вікторія Володимирівна

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


Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

(підпис)

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.7109.022.БР	Пояснювальна записка	63	
3	A1	141.7109.022.БР	Схема системи векторного керування СДПМ	1	
4	A1	141.7109.022.БР	Результати досліджень статичних та динамічних режимів генеруючої системи	1	
5	A1	141.7109.022.БР	Функціональна схема силових частин керування вітроенергосистемою	1	

				141.7109.022.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Постоялко Д.А.				2	63
Керівн.	Король С.В.					
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71	

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проекту**

на тему: Портативний вітрогенератор на базі синхронної машини

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітня програма – електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Сергій Пересада

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

## ЗАВДАННЯ

**на дипломний проект студенту**

Постоялка Дмитра Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Портативний вітрогенератор на базі синхронної машини

керівник проекту Король Сергій Вікторович., доц

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

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту 09.06.2021

3. Вихідні дані до проекту матеріали переддипломної практики та рекомендована література

4. Зміст пояснювальної записки   Зміст, Вступ, 1 Аналітичний огляд систем вітрогенерування, 2. Визначення потужності генератора, 3 Синтез системи керування, 4 Дослідження статичних та динамічних режимів генеруючої системи, 5 Силова частина – розробка схеми керування, Перелік посилань

5. Консультанти розділів проекту\*

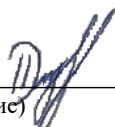
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання 29.03.2021

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд систем вітрогенерування	01.04.2021	
2	Визначення потужності генератора	20.04.2021	
3	Синтез системи керування	05.05.2021	
4	Дослідження статичних та динамічних режимів генеруючої системи	10.05.2021	
5	Силова частина – розробка схеми керування	20.05.2021	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації	03.06.2021	


Студент

  
(підпис)

Д.А. Постоялко

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

  
(підпис)

С.В. Король,

(ініціали, прізвище)



## РЕФЕРАТ

*Дипломний проект містить:* сторінок – 63, рисунків – 22, таблиць – 13, джерел – 24 та графічну частину на 3 листах А1.

Метою даного дипломного проекту є розробка портативний вітрогенератор на базі синхронної машини. Проведено розрахунок параметрів та досліджено систему векторного керування методом математичного моделювання. Розроблена силова частини схема керування пристроєм. Забезпечена автономність роботи за допомогою акумуляторної батареї.

Графічна частина включає: структурну схему системи векторного керування СДПМ та функціональну схему силової частини керування вітроенергосистеми, результати досліджень.

ПОРТАТИВНИЙ ВІТРОГЕНЕРАТОР, СИНХРОНИЙ ГЕНЕРАТОР З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ.

					141.7109.022.БР			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Портативний вітрогенератор на базі синхронної машини  Реферат	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Постоялко Д.А.					6	63
Перевір.		Король С.В.						
Н. Контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП -71		
Затверд.		Пересада С.М.						



## SUMMARY

*The diploma project includes:* pages –63, drawings – 22, tables – 13, applications – 24 and graphic part on 3 sheets A1.

The purpose of this diploma project is to develop a portable wind generator based on a synchronous machine. The calculation of parameters and research is a vector control system using the method of mathematical modeling. The device control scheme has been developed. Autonomous operation with the help of a rechargeable battery is provided.

The graphic part includes: the structural scheme of the SDPM vector control system and the functional diagram of the power part of the wind power system control, research results.

PORTABLE WIND GENERATOR, PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR, VECTOR CONTROL, MATHEMATICAL MODEL, CONTROL SYSTEM SYNTHESIS, FREQUENCY CONVERTER.

					<h1>141.7109.022.BW</h1>			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date	Portable wind turbine based on a synchronous machine Summary	L.	Page	Pages
Devel.		D. Postoiako					7	63
Checked		S. Korol						
N. Contr.								
Approved.		S. Peresada				NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, FEA, gr. EP -71		

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ .....	4
ЗМІСТ .....	8
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ВІТРОГЕНЕРУВАННЯ.....	11
1.1 Типи та конструкції портативних вітрогенераторів.....	11
1.2 Типи турбін.....	15
1.3 Варіанти конфігурації систем та задачі керування вітрогенератором .....	17
1.4 Актуальність теми.....	18
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА .....	21
2.1 Енергосиловий розрахунок параметрів вітротурбіни .....	22
2.2 Обґрунтування та вибір потужності генератора.....	24
2.3 Розрахунок потужності та вибір системи генерування .....	26
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	30
3.1 Система керування вітряною турбіною.....	30
3.2 Математична модель СГПМ.....	31
3.3 Розрахунок параметрів електричної машини .....	34
3.4 Структура векторного керування електричною машиною.....	38
4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ГЕНЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ.....	42
4.1 Дослідження системи генерування .....	42
5 СИЛОВА ЧАСТИНА – РОЗРОБКА СХЕМИ КЕРУВАННЯ.....	49
5.1 Розрахунок блоку акумуляторного пристрою вітряної установки .....	49
5.1.1 Розрахунок ємності акумулятора .....	49
5.1.2 Вибір контролеру заряду/розряду акумуляторної батареї.....	50
5.2 Розробка силової частини перетворювача.....	51
5.2.1 Розрахунок ланки постійного струму .....	51
5.2.2 Розрахунок автономного інвертора.....	51
5.2.3 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторного фільтра.....	53



5.2.4 Розрахунок та вибір давачів струму, напруги, кутової швидкості та швидкості вітру .....	53
5.3 Розробка системи керування на базі контролера .....	55
5.3.1 Вибір контролера для системи керування .....	55
5.3.2 Вибір блоку живлення .....	56
5.3.3 Гальванічна розв'язка сигналів контролера .....	58
ВИСНОВКИ .....	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	62

## ВСТУП

Використання альтернативних джерел енергії є дуже актуальним у багатьох країнах світу. Серед всіх доступних альтернативних джерел виділимо вітрову енергетику.

Вітроустановки не вимагають наявності палива або води і вони можуть бути повністю автоматизовані. Сучасна вітроенергетика в багатьох розвинених країнах світу є частиною енергетичних систем, а в ряді країн – однієї з головних складових альтернативної енергетики на поновлюваних джерелах енергії.

Головною машиною є вітрогенератор, який поділяється як по формі, так і за типом електричної машини, яка в ньому використовується. Нами буде розглядатися вітрогенератор на основі синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ), який дуже поширений даній області. Це обумовлюється великою кількістю переваг пропонованого типу машин. Такими як, високий ККД, простота конструкції та габарити, висока ефективність. Також досить надійні та практично не мають потреби в обслуговуванні протягом усього терміну служби. Таким чином застосування СГПМ є привабливими в різних областях, навіть в альтернативній енергетиці.

Застосування векторного типу керування дозволить реалізовувати різні методи оптимізації роботи електричної машини, а також підвищити ефективність перетворення механічної енергії в електричну.

Актуальною задачею є дослідження і модернізація алгоритмів векторного керування синхронним генератором, що дозволяють реалізувати керування системою генерування.

Метою проекту є розробка портативного вітрогенератора на базі синхронної машини.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ВІТРОГЕНЕРУВАННЯ

## 1.1 Типи та конструкції портативних вітрогенераторів

Вітроелектрична установка (ВЕУ) – пристрій, що перетворює кінетичну енергію вітру в електричну за допомогою вітрових турбін. Типова турбіна ВЕУ має горизонтальну вісь з трилопатеvim ротором.

Вітер використовується для виробництва електрики з використанням кінетичної енергії, створюваної рухомим повітрям. Вона перетворюється в електричну енергію за допомогою вітряних турбін або систем перетворення енергії вітру. Вітер спочатку вражає лопаті турбіни, змушуючи їх обертатися і обертати приєднану до них турбіну. Це змінює кінетичну енергію на енергію обертання, переміщаючи вал, який підключений до генератора, і тим самим виробляє електричну енергію за рахунок електромагнетизму.

Кількість енергії, яку можна отримати від вітру, залежить від розміру турбіни і довжини її лопатей. Потужність пропорційна розмірам ротора і кубу швидкості вітру. Для зарядки акумуляторів ставиться контролер між вітряком і АКБ. Він відстежує зарядку АКБ, щоб не зіпсувати акумулятори. При необхідності він може скидати зайву енергію на певний баласт, наприклад, великий резистор або туди для опалення [2].

Перетворений струм направляється споживачу, щоб жити пристрої. Існують два типи портативних вітрогенераторів по осі обертання:

1) Вертикальний тип – турбіна розташована вертикально по відношенню до земної поверхні. Застосовується при відносно низькій швидкості вітру. При такому розташуванні аеродинамічного рушія, ви взагалі не залежите від напрямку вітру. Обертання однаково ефективно, і залежить тільки від сили потоку повітря.



Рисунок 1.1 – Портативні вітрогенератори з вертикальною віссю обертання

Різновиди вертикальних генераторів:

**1. Генератори з ротором Савоніса.** Ротор Савоніуса – одна з вітряних турбін з вертикальною віссю. Він простий за структурою, має хороші пускові характеристики, відносно низькі робочі швидкості та здатність захоплювати вітер з будь-якого напрямку. Але він має низьку аеродинамічну ефективність. Ротор Савоніуса побудований просто з двох вертикальних напівциліндрів. Постійне осьове обертання і потік вітру не перебувають в залежності один від одного. Навіть при різких поривах він крутиться із заданою спочатку швидкістю.

**2. Генератори з ротором Дар'є.** Вітрогенератор, обладнаний ротором Дар'є, має вертикальну вісь обертання та 2-3 плоских смугових лопатки без характерного аеродинамічного профілю, закріплених в основі та у верхній частині осі обертання.

Агрегат у своїй роботі не фокусується на силі чи напрямку вітру, має високу швидкість обертання та дозволяє розміщувати приводні пристрої на землі, що полегшує та пришвидшує процес планового технічного обслуговування та можливого ремонту.

**3. Гелікоїдний ротор.** Це екологічно чиста технологія особливої форми, яка отримує енергію від вітру. У більшості випадків конструкція гвинтових вітряної турбіни являє собою якусь спіраль. Ці турбіни часто виглядають як гігантські спіралі ДНК або величезні свердла, що вказують в небо. Хоча гвинтові вітряні турбіни можуть бути різних конструкцій, форм і кольорів, всі вони намагаються використовувати силу вітру для створення корисної енергії.

**4. Багатолопатеви́й ротор.** Даний тип вітрогенератора так само є модернізованим ортогональним ВЕУ. Такий ротор має 2 ряди лопатей: 1-й ряд, зовнішній, статичний, він є напрямним апаратом, що захоплює вітровий потік, стискає його і збільшує швидкість вітру; 2-й ряд – рухливий ротор, на який потрапляє потік повітря від 1-го ротора під певним кутом.

**5. Ортогональний ротор.** Ортогональні вітрогенератори мають вертикальну вісь обертання, лопаті у даного типу ВЕУ розташовуються на деякому віддаленні від центральної осі паралельно їй. Даний тип вітрогенераторів має такі переваги, як: відсутність необхідності наведення на вітер, за рахунок вертикальної осі обертання спрощується передача обертового моменту на вал генератора, приводні системи можна розташовувати на рівні землі (значне спрощення обслуговування і експлуатації). При наявності деяких привілеїв перед горизонтальноосевими ВЕУ, даний тип має і недоліки: низький ресурс опорних вузлів за рахунок великих навантажень з боку масивного ротора, підйомна сила лопасті якого змінює свій вектор на  $360^\circ$ ; більш низький ККД, внаслідок зміни кутів атаки лопатей вітрогенератора в більш широкому діапазоні, в порівнянні з горизонтальноосевою ВЕУ, де кути можна виставити оптимально.

2) Горизонтальний тип – вісь ротора обертається паралельно земної поверхні. Ці вітрогенератори мають більш складну конструкцію, ніж попередні. Такий тип передбачає вільне обертання навколо вертикальної осі, для позиціонування «за вітром».



Рисунок 1.2 – Портативні вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання

Різновиди горизонтальних генераторів:

1. **Вітрогенератор, влаштований за типом парусника.** Тарілкоподібна конструкція під напором повітря приводить в рух поршні, які активують гідросистему. Як результат, відбувається трансформація фізичної енергії в електричну. Під час роботи установка не шумить. Високі показники потужності та легко керована.

2. **Літаючий вітрогенератор-крило.** Використовується без щогли, генератора, ротора і лопатей. У порівнянні з класичними конструкціями, які функціонують на невеликій висоті при непостійній силі вітру, а спорудження високих щогл справа трудомістка і дороге, "крило" таких проблем не має.

Основні елементи конструкції портативних вітрогенераторів:

- 1) Пропелер, який може бути встановлений безпосередньо на вал генератора.
- 2) Генератор.
- 3) Інвертор, регулятор напруги, стабілізатор – в залежності від обраної напруги.
- 4) Акумуляторні батареї, що забезпечують безперервність генерації,

незалежно від наявності вітру.

### 5) Щогла з розтяжками.

## 1.2 Типи турбін

Тип конструкції вітрогенератора з використанням турбіни є одним з найбільш ефективних. Бо пристроях подібного типу досягається оптимальне поєднання площі лопатей і їх конфігурації. Зниження розмірів компенсується збільшенням числа, а паралельно з цим відбувається різке зменшення негативного врівноважує впливу на зворотні сторони лопатей, яке створює зусилля, що протидіє обертанню.

Високий рівень ККД турбінні конструкції та низький рівень шуму, що викликано малою площею лопатей і відносно невеликими габаритами самого пристрою.

Ортогональні вітроустановки з вертикальною віссю обертання, які використовують підймальну силу крила, мають ККД трохи менше пропелерних, тому їх ефективність також висока. Але у таких вертикально-осьових турбін є інший недолік – вони не можуть самостійно почати обертання, і для їх запуску їх треба розкрутити – або від мережі, або за допомогою іншої вітротурбіни, що має стартовий момент обертання.

Вертикально-осьові вітротурбіни (ВОВТ), як правило, менш ефективні, ніж горизонтально-осьові вітротурбіни (ГОВТ), з наступних причин:

1) Лопать відчуває опір при обертанні, тому що на частини траєкторії вона повинна рухатися протилежно напрямку вітру.

2) ВОВТ часто встановлені на більш низькій висоті (земля або дах будівлі), де швидкість вітру менше.

3) ВОВТ мають проблеми, пов'язані з вібрацією, наприклад, шум і швидший знос і розрив опорної конструкції (бо повітряний потік має велику турбулентність на низькій висоті).

Навантаження на електрогенератор від маси вітротурбіни, якщо вона встановлена на одному валу з електрогенератором [2].

Основні типи турбін:

1) **Вітрова турбіна гіперболоїдного типу.** Конструкція, основна ідея якої полягає в максимальному збільшенні коефіцієнта корисної дії завдяки зниженню протидії тиску вітру на зворотні сторони лопатей. Являє собою вертикальний ротор зі стрижневими лопатями, розташованими по окружності обертання, створюють обриси у вигляді гіперболоїда. Корисна площа впливу потоку істотно зростає. Ефективність такого пристрою набагато вище, ніж у звичайних конструкцій, запуск ротора можливий при вітрі всього 1,4 м/с.

2) **Вітротурбіна Дарье.** Його особливість полягає в тому, що він використовує підймальну силу аеродинаміки лопатей, які в поперечнику мають форму крила. Стартовий обертальний момент такого ротора невеликий, а швидкохідні висока. Завдяки цьому його потужність по відношенню до власної маси найбільша. Це дозволяє мати одну або більше лопатей, і кілька різновидів форми ротора.

3) **Ротор Савоніуса** – це конструкція з вертикальною віссю обертання. Лопаті такого ротора є вигнуті площини, об'єднані зазвичай по 2 шт. Це викликано тим, що велика площа лопатей викликає сильні протидійні навантаження, коли потоком вітру створюється тиск на тильні сторони. Створюється компенсує тиск, врівноважує вплив на обидві сторони лопаток, що створює труднощі при запуску.

4) **Ротор Третьякова** – це діагональний вітрогенератор, який ловитиме, активно реагує на потік зі швидкістю від 1,4 м / с. Це дуже вдала конструкція, якщо враховувати, що звичайні вертикальні ротори починають рух при швидкостях потоку в 3-4 м / с. [1].

Вітрогенератор з горизонтальною віссю обертання, має дві або три лопаті, встановлені на вершині щогли - найбільш поширений тип вітроустановок ВЕУ. Сучасні горизонтальні вітрогенератори є установку, яка служить для перероблення кінетичної енергії вітру в механічну енергію за допомогою лопат, а потім в електричну за допомогою електричного генератора. Для побутового використання, як правило, встановлюється один вітрогенератор, підключений до системи



домашнього електропостачання, яка містить також накопичувальні акумулятори.

### **1.3 Варіанти конфігурації систем та задачі керування вітрогенератором**

Головною задачею вітрогенератора є забезпечення необхідною електроенергією споживача використовуючи енергію вітру.

Варіанти конфігурацій систем вітрогенератора:

**1) Автономні системи енергопостачання.** Вітроелектрична автономна система, працює незалежно від мережі централізованого енергопостачання. У такому випадку ВЕУ може працювати самостійно, тобто використовуватися як дублер будь-якого іншого генератора. Такі системи використовуються для електропостачання приватних будинків, ферм або малих підприємств.

**2) Гібридна енергетична система.** Гібридна енергосистема являє собою використання ВЕУ спільно з іншими джерелами енергії, наприклад: дизель-генератор, сонячні модулі і т.п.. Дані джерела енергії доповнюють ВЕУ з метою забезпечення безперебійною електроподачею споживача в безвітряну погоду.

**3) Вітро-дизельні системи.** Вітро-дизельна система складається з ВЕУ і дизель-електричної системи (ДЕС). Гібридні вітро-дизельні системи з високим проникненням енергії вітру мають три режими роботи: лише дизельний, вітровий дизельний та лише вітровий. У дизельному режимі максимальна потужність вітрогенератора завжди значно менша за навантаження системи. Це режим класичної дизельної електростанції. У цьому випадку дизель-генератори ніколи не припиняють роботу і подають активну та реактивну потужність, яку вимагає навантаження споживача. Регулювання частоти виконується регуляторами розподілу навантаження та швидкості, що контролюють кожен дизельний двигун, а регулювання напруги здійснюється синхронними регуляторами напруги в кожному генераторі. Основні цілі - максимізація економії палива або мінімізація витрат на виробництво для забезпечення фактичного навантаження досягається ретельним плануванням / складанням графіку ДГ з урахуванням таких факторів, як їх питома витрата палива, номінальна потужність тощо.

4) **Вітро-сонячні системи.** В даній системі електрична енергія отримана завдяки перетворенню сонячного випромінювання фотоелектричними батареями і ВЕУ. Попри високу, зараз, вартість фотоелектричної батареї, їх використання спільно з ВЕУ в інколи може бути дуже ефективним. Оскільки в зимний сезон існує великий потенціал вітру, а в літній сезон максимальний ефект можна отримати, використовуючи фотоелектричну батарею, тоді поєднання цих джерел виявляється вигідним для споживача.

5) **Використання вітроустановок спільно з мікроГЕС.** ВЕУ можуть комбінуватися з мікроГЕС, що мають резервуар для води. В таких системах вітроагрегат буде живити навантаження при наявності вітру. У періоди вітрового затишшя енергія виробляється з допомогою мікроГЕС. Подібні системи ефективні при малих ресурсах гідроенергії.

6) **Установки, підключені до енергомереж ВЕУ.** Дана система підключена до енергомережі, яка поставляє вітроустановці активну і реактивну потужність для забезпечення запуску, роботи та контролю вітроустановки. Електроенергія, вироблена ВЕУ, надходить безпосередньо в мережу.

Сполучені з мережею ВЕУ встановлюються на великих територіях з хорошими вітроенергетичними ресурсами для виробництва електроенергії. Турбіни встановлені групою створюють так звану "вітроферму". Вітроферми – це комплекс ВЕУ, часто встановлених рядами, які перпендикулярні переважному напрямку вітру[4].

## 1.4 Актуальність теми

Енергія вітру останніми роками стає одним з найбільш популярним джерелам альтернативних джерел енергії. Бо багато людей замислилися над тим, що можна використовувати потужну силу вітру для своїх потреб. В цей час потенціал вітрової енергетики є досить великим і розвиток його йде досить швидко. Клімат різних регіонів дозволяє активно розвивати вітрову енергетику сотням різних держав. Через те, що енергія вітру не залежить від пори року і місця, можна і взимку, і

влітку, на сніжному півночі або спекотному півдні – вітер є скрізь, що робить даний спосіб отримання енергії досить перспективним для використання.

Вітрова енергетика найбільш вигідна в регіонах, де інших джерел енергії дуже мало, а доставляння енергії досить проблематична і дорого. Для даних регіонів використання вітростанцій – є виходом зі складного становища і незалежність від будь-яких умов, з якими вони можуть зіткнутися. Вітрова енергетика має попит та застосовується в різних галузях людського життя, вітрові установки можна побачити як в приватних будинках, так і великих промислових виробництвах. Вітрова енергетика – є екологічно чистий способом отримання енергії, що є дуже актуальним на даний час і тому приділяється велика увага.

Створення більш мобільних, портативних вітрогенераторів є дуже актуальним проєкт. Через те, що даний пристрій буде невеликого розміру, що його можна буде взяти з собою в подорож та використовувати в будь-який місці де є потоки вітру. Потужність, яку він буде видавати можна буде зарядити свій будь-який пристрій. Вартість даного вітрогенератора є доступною.

## **Висновки з розділу 1**

1. В даному розділі зроблено порівняння різних типів та конструкцій портативних вітрогенераторів для аналізу переваг та недоліків кожного типу.
2. Розглянуті основні конструкційні особливості вітрогенераторів. Визначені всі можливі типи турбін, які можуть бути використані при проектуванні портативного генератора. Їх конструкції та особливості. Описано всі можливі варіанти конфігурації систем вітрогенератора з різними джерелами. В якості турбіни обрали з горизонтальною віссю обертання, так як в неї вища продуктивність та швидша окупність.
3. ВЕУ повинна бути автономною, тобто функціонувати самостійно. Для забезпечення економічності установки та її окупності.
4. Актуальність теми полягає у тому, що вітрова енергетика найбільш затребуваних джерел альтернативної енергії. Створення подібного роду пристроїв

повинно бути дуже рентабельна на ринку.

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА

Відомо, що вихідна потужність генератора вітроелектричної установки залежить від конструкції лопатей і кінетичної енергії вітру. Кінетичну енергію повітряного потоку, із середньою швидкістю  $V$ , що проходить через поперечний переріз з площею  $S$ , перпендикулярно швидкості вітру, і масу повітря  $m$  визначається за формулою [6]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (2.1)$$

де  $m = \rho \cdot V \cdot S$ ;  $\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$  – щільність повітря відповідна нормальним кліматичним умовам:  $t = 15^\circ\text{C}$ , тиск дорівнює  $760 \text{ мм рт.ст.}$  ( $101,3 \text{ кПа}$ );  $S$  – очікувана площа вітроколеса (ВК) з горизонтальною віссю обертання, визначається за формулою

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.2)$$

де  $D$  – діаметр вітроколеса.

Якщо в (2.1) підставити значення маси повітря  $m$  і захоплюваної площі вітроколеса  $S$ , отримаємо формулу для визначення механічної потужності ВЕУ

$$N_{\text{БК}} = 0,5 \cdot \rho \cdot \xi \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (2.3)$$

де  $\xi = 0,4 \dots 0,45$  - коефіцієнт використання енергії вітру.

Електрична потужність ВЕУ

$$P_{\text{ВЭУ}} = N_{\text{БК}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{Г}} \quad (2.4)$$

де  $\eta_{\text{мех}} = 0,8 \dots 0,9$  - механічне ККД ветроагрегата;  $\eta_{\text{Г}} = 0,7 \dots 0,9$  – ККД генератора електроенергії з урахуванням ККД стабілізатора напруги.

Після підстановки всіх зазначених середніх значень коефіцієнтів в (2.4) і (2.3) виходить орієнтовна формула для визначення електричної потужності генератора ВЕУ:

$$P_{\text{ВЭУ}} = 0,68 \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (2.5)$$

Як видно з формули (2.5), електрична потужність генератора ВЕУ в основному залежить від діаметра ВК і швидкості вітру. Відомо також, що потужність генератора ВЕУ також залежить від форми і профілю лопатей. В даний час широкого поширення набули ВЕУ з крильчасті ВК і горизонтальною віссю обертання.

Потужність генератора ВЕУ пропорційна швидкості вітру в третього ступеня. Тому при зміні швидкості вітру в широкому діапазоні відбуваються великі втрати енергії в генераторах, внаслідок їх низьких ККД на малих навантаженнях. Для виключення цього недоліку в деяких ВЕУ застосовують два генератори, з номінальними потужностями 100% і 20 - 30% від номінальної потужності ВЕУ. При слабких вітрах перший генератор відключається. В деяких ВЕУ малий генератор забезпечує також можливість роботи установки при малих швидкостях вітру, при знижених оборотах з високим значенням коефіцієнта використання енергії вітру. [5]

## 2.1 Енергосиловий розрахунок параметрів вітротурбіни

Розрахунок вітротурбіни зводиться до знання крутного моменту, який він розвиває на рівні ротора, і того, що він витягує потужність вітру

$$P_m = 0.5 \rho A C_p (\lambda, \beta) v_w^3, \quad (2.6)$$

де  $P_m$  – потужність;

$\rho$  – питомої щільності повітря;

$A = \pi \cdot R^2$  – площі розгортки лопатей турбіни;

$C_p$  – коефіцієнт потужності;

$v_w$  – швидкість вітру м/с.

Швидкохідність визначається як:

$$\lambda = (\omega_r R / v_w). \quad (2.7)$$

де  $R$  – радіус лопатей.

Номінальна швидкохідність  $\lambda_n$  залежить від конструкції вітрової установки.

Синхронна швидкохідність  $\lambda_0$  визначається при  $C_p = 0$ .

Загальне рівняння при  $\lambda_n < \lambda < \lambda_0$ , яке використовується для моделювання характеристики вітрової турбіни представлено як

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

де  $C_{p\_max}$  – максимальний коефіцієнт використання енергії вітру.

При швидкохідності від 0 до  $\lambda_n$  ( $\lambda < \lambda_n$ ), можна апроксимувати виразом:

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

Числове значення  $\lambda_0$  у (2.2) можна розрахувати залежно від  $\sigma_{per}$  – параметр, що являє собою суму хорд профілів відносно радіуса  $R$  на периферії вітроколеса і пов'язаний з шириною кінчика лопаті  $b_{per}$  і числом лопатей  $i$ :

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

Знайшовши  $\sigma_{per}$  можна знайти  $\lambda_0$ , яке апроксимується виразом:

$$\lambda_0 = \frac{188.93 \sigma_{per} + 20.62}{28.22 \sigma_{per} - 1}. \quad (2.11)$$

Звідси можна визначити значення обертаючого момент, що діє на вал, в такий спосіб:

$$M = \frac{P_m}{v_w}. \quad (2.12)$$

З формул можна зробити висновок, обертального момент залежить від значення швидкості вітру.

## 2.2 Обґрунтування та вибір потужності генератора

Потужність вітрогенератора залежить від швидкості вітру, площі захоплюваної поверхні і ефективності вітрогенератора. Це основні фактори, що впливають на вироблювану вітрогенератора потужність. На вироблення також впливає турбулентність вітропотоків, щільність повітря, рівномірність розподілу швидкості вітру по захоплюваної площі.

Обираємо три варіанти вітрогенераторів зі значеннями швидкості вітру  $8-12 \text{ м/с}$ , що забезпечить малу вартість вироблюваної ними електроенергії.

Таблиця 2.1 – Параметри вітрогенераторів

Вітрогенератор	№1	№2	№3
Номінальна потужність, кВт	0.75	1	1
Діаметр вітротурбіни, м	1.5	1.6	2.3
Розрахункова швидкість вітру, м/с	10	11.5	9.5

Як можемо побачити з таблиці, зі зменшенням потужності збільшується компактність вітротурбіни на вітрогенераторах №2 і номер №3

При цьому ціни на вітрогенераторах складатимуть відповідно №1 - 1650 у.о., №2 - 2510 у.о., №3 - 4410 у.о.

Для більш об'єктивного порівняння даних генераторів оцінимо вартість виробленої ними електроенергії. Для наочності зобразимо графік (Рисунок 2.1), на якому представлена залежність потужності від швидкості вітру.



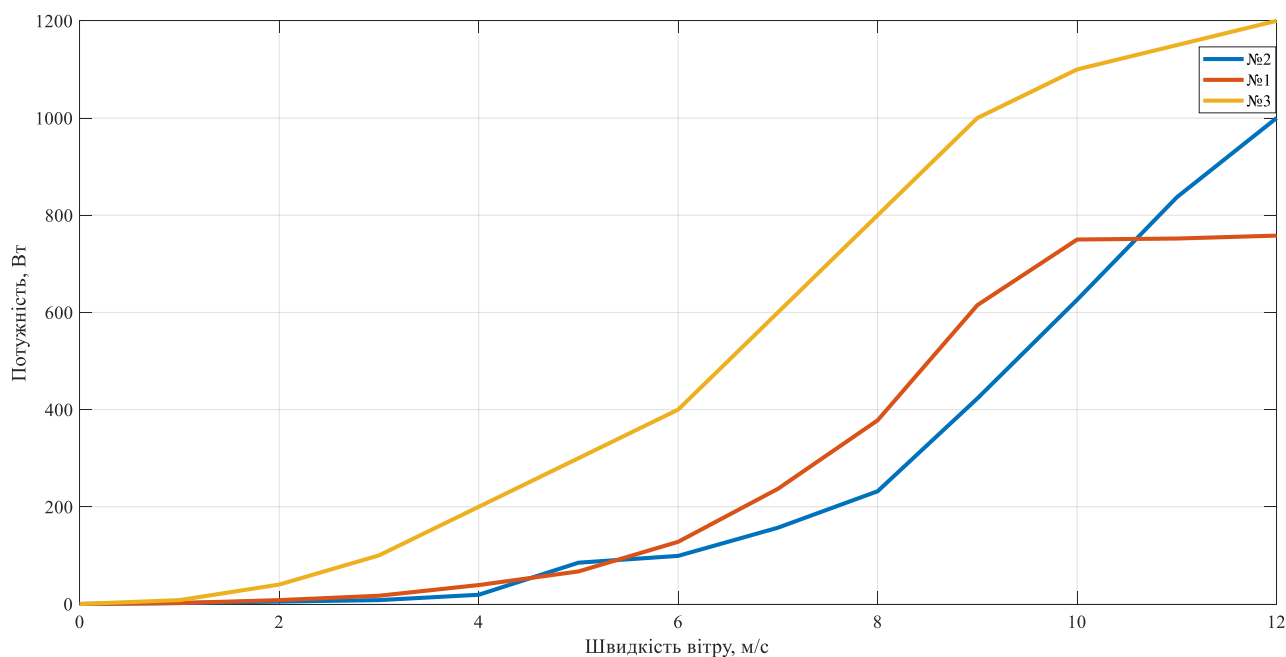


Рисунок 2.1 – Графік залежності потужності трьох різних генераторів від швидкості вітру

З графіку можна побачити, що в діапазоні швидкостей вітру вітрогенератор №3 розвиває помітно велику потужність ніж його суперники.

Для більш детального порівняння обчислимо вартість електроенергії, яку виробить кожен з генераторів за 10 років при різних середніх швидкостях вітру. Результати представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Вартісне обчислення обраних вітрогенераторів

Вітрогенератор		№1	№2	№3
Вартість, у.е.		1650	2510	4410
$V_{сер} = 4 \text{ м / с}$	Вироблення за місяць, $\text{кВт} \cdot \text{год}$	39	29	200
	Вироблення за 10 років, $\text{кВт} \cdot \text{год}$	4680	3480	24000
	Вартість енергії, $\text{у.о} / \text{кВт} \cdot \text{год}$	0.353	0.721	0.184
$V_{сер} = 5 \text{ м / с}$	Вироблення за місяць, $\text{кВт} \cdot \text{год}$	67	85	300
	Вироблення за 10 років, $\text{кВт} \cdot \text{год}$	8040	10200	36000
	Вартість енергії, $\text{у.о} / \text{кВт} \cdot \text{год}$	0.205	0.24	0.123

Продовження таблиці 2.2

Вітрогенератор		№1	№2	№3
$V_{сер} = 6 м / с$	Вироблення за місяць, $кВт \cdot год$	118	99	400
	Вироблення за 10 років, $кВт \cdot год$	14160	11880	48000
	Вартість енергії, $у.о / кВт \cdot год$	0.116	0.21	0.092
$V_{сер} = 7 м / с$	Вироблення за місяць, $кВт \cdot год$	237	157	600
	Вироблення за 10 років, $кВт \cdot год$	28440	18840	67200
	Вартість енергії, $у.о / кВт \cdot год$	0.058	0.13	0.061
$V_{сер} = 8 м / с$	Вироблення за місяць, $кВт \cdot год$	374	232	800
	Вироблення за 10 років, $кВт \cdot год$	45360	27840	96000
	Вартість енергії, $у.о / кВт \cdot год$	0.036	0.09	0.045

З розрахунку бачимо, що вітрогенератори №1 та №3 є найбільш вигіднішими. Різниця більша у районах з невеликими швидкостями вітру, трохи менше – для місць з мінімальною швидкістю вітру. З трьох вітрогенераторів найменш вигідним виявився вітрогенератор №2.

### 2.3 Розрахунок потужності та вибір системи генерування

Розрахунок синхронного генератора з постійними магнітами. Номінальна потужність генератора і номінальна частота обертання визначаються при розрахунку параметрів ротора вітроустановки.

Потужність на валу ротора вітроустановки:

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3, \quad (2.11)$$

де  $C_p$  – коефіцієнт використання енергії вітру;  $\rho$  – щільність повітря;  $S$  – площа захоплюваної поверхні ротора;  $V$  – швидкість вітрового потоку.

Із (2.13) отримуємо площа захоплюваної поверхні ротора:

$$S = \frac{2 \cdot P_p}{C_p \cdot \rho \cdot V^3}, \quad (2.12)$$

відповідно, радіус ротора дорівнюватиме:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (2.13)$$

Маючи радіус ротора, знаходимо частоту його обертання:

$$\omega = \frac{Z_H \cdot V}{R}, \quad (2.14)$$

де  $Z_H$  – коефіцієнт номінальної швидкохідності ротора. Номінальна потужність генератора:

$$P = P_p \cdot \eta, \quad (2.15)$$

де  $\eta$  – ККД трансмісії від ротора до генератору.

Номінальна частота обертання генератора:

$$\omega = \omega_p \cdot i_T, \quad (2.16)$$

де  $i_T$  – передавальне відношення трансмісії від ротора до генератора.

Фазна напруга і частота вихідної напруги визначаються з вимог до системи генерації електричної енергії.

Розрахунок основних параметрів генератора.

Потужність 3-х фазного генератора дорівнює:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi, \quad (2.17)$$

де  $I_\phi$  – фазний струм;  $\cos \varphi \cong 0,8 \div 0,85$  – коефіцієнт потужності.

Фазний струм дорівнює:

$$I_\phi = \frac{P}{3 \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi}, \quad (2.18)$$

Електромагнітний момент генератора:

$$M_E = \frac{P}{\omega}, \quad (2.19)$$

З іншого боку, електромагнітний момент може бути визначений за формулою:

$$M_E = \alpha \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot D_C^3 \cdot \lambda, \quad (2.20)$$

де  $\alpha_i \cong 0,72 \div 0,8$  – коефіцієнт полюсного перекриття;  $A \cong (10 \div 12) \cdot 10^3$  А/м лінійне навантаження;  $B_\delta$  – значення індукції;  $D_C$  – діаметр статора;  $\lambda$  – відношення активної довжини тороїдального сердечника статора до його діаметру.

Схема перетворювального пристрою

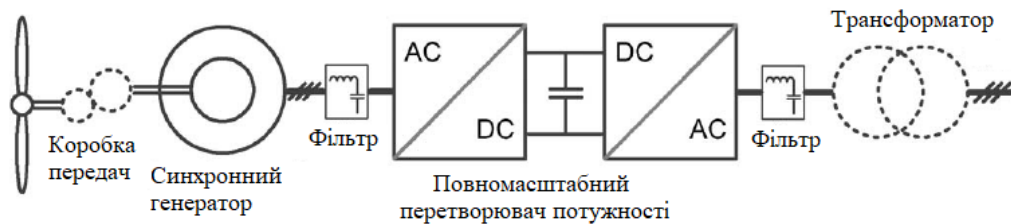


Рисунок 2.2 – Подвійний індукційний генератор з повномасштабним перетворювачем потужності

Вітрова турбіна генерує крутний момент завдяки енергії вітру. Крутний момент передається через вал генератора на ротор генератора. Генератор створює електричний крутний момент, і різниця між механічним крутним моментом від вітряної турбіни, і електричним крутним моментом від генератора визначає, прискорюється чи механічна система, сповільнюється або залишається на постійній швидкості. Генератор підключений до трифазного інвертора, який випрямляє струм від генератора для зарядки конденсатора проміжного контуру. Лінія постійного струму живить другий трифазний інвертор, який підключений до мережі через трансформатор. Через систему управління інформація про швидкість вітру, оборотах ротора і виході інвертора приймається для порівняння з даними на стороні мережі [7].

## Висновок з розділу 2

1. В цьому розділі описані основні рівняння для визначення потужності генератора ВЕУ. Виявлено, що при зміні швидкості вітру в широкому діапазоні

відбуваються великі втрати енергії в генераторах внаслідок їх низьких ККД на малих навантаженнях.

2. Здійснено вибір генератора для вітроустановки методом порівняння трьох різних генераторів та розраховані на невелику швидкість вітру для генерування великого об'єму електричної енергії, що дозволяє забезпечити мінімальну вартість вироблюваної ними електроенергії. Описані основні рівняння для перетворюючого пристрою та описана схема перетворювального пристрою.

3. Здійснено енергосиловий розрахунок параметрів вітротурбіни. В результаті якого визначено, що обертальний момент залежить від значення швидкості вітру.

### 3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Система керування вітряною турбіною

Система керування вітряної турбіни призначена для:

1. Максимальної ефективності роботи, яка максимізує коефіцієнт потужності.

2. Забезпечення безпечної роботи при будь-яких вітрових умовах.

Система керування вітряними турбінами діляться на три функціональних елементи:

1. Керування групами вітряних турбін в вітроелектростанції.

2. Наглядовий контроль кожної окремої вітряної турбіни.

3. Окремі спеціалізовані динамічні контролери для різних підсистем вітряних турбін.

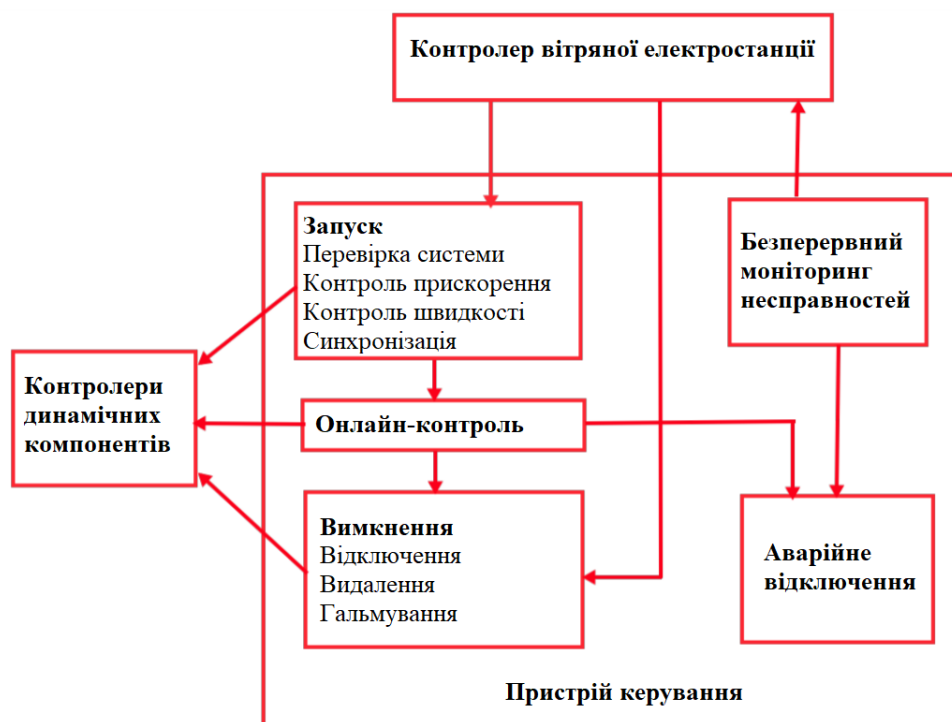


Рисунок 3.1 – Схема контролю вітряної турбіни

Функція контролера вітряної електростанції - «управління потужністю».

- він може запускати і зупиняти роботу турбіни, а також координувати роботу безлічі вітряних турбін відповідності до умов навколишнього середовища і експлуатації;

- контролер диспетчерського управління вітряної турбіни управляє роботою окремої турбіни;

- включаючи виробництво електроенергії, відключення при слабкому вітру, відключення при сильному вітру, високі межі навантаження, а також упорядкований запуск і зупинка;

- також забезпечує керуючий вхід для динамічних контролерів для оборотів у хвилину. контроль для підтримки оптимального співвідношення кінцевої швидкості і регулювання кроку лопатей.

### 3.2 Математична модель СГПМ

При складанні математичної моделі СГПМ, необхідно прийняти деякі припущення:

- 1) немає насичення магнітного кола і втрат в сталій;
- 2) симетричне розташування обмотки статора;
- 3) індуктивність розсіювання не має залежності від положення ротора в просторі.

$(a-b)$ ,  $(d-q)$  – системи координат статора та ротора [12];

$(u_{1a}, u_{1b})$ ,  $(i_{1a}, i_{1b})$  – компоненти векторів напруги та струму статора,

$i_f = \text{const}$  – струм фіктивного джерела струму, що схематизує дію постійних магнітів;

$\theta$ ,  $\omega$  – кутове положення та кутова швидкість ротора відносно статора,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}.$$

Для синхронного генератора сформуємо вектори змінних статора

$$\mathbf{i} = (i_{1a}, i_{1b}, i_f)^T$$

$$\Psi = (\Psi_{1a}, \Psi_{1b}, \Psi_f)^T \quad (3.1)$$

$$\mathbf{u}_1 = (u_{1a}, u_{1b})^T$$

За умов відсутності явнополюсності матриця індуктивності електричної машини

$$\mathbf{L}(\varepsilon) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_m \cos \theta \\ 0 & L_1 & L_m \sin \theta \\ L_m \cos \theta & L_m \sin \theta & L_f \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

де  $L_1, L_f$  – індуктивності статорної та фіктивних обмоток;

$L_m$  – індуктивність контуру намагнічування

Рівняння енергії та моменту електричної машини визначаються:

$$W(\theta) = \left( \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}(\theta) \mathbf{i} \right) \quad (3.3)$$

$$M = \frac{\partial W(\theta)}{\partial \theta} \quad (3.4)$$

Після підставлення (3.1) – (3.3) в (3.4) отримано наступний вираз для моменту СТ:

$$\begin{aligned} M &= \left( \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} \right) = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_m \sin \theta \\ 0 & 0 & L_m \cos \theta \\ -L_m \sin \theta & L_m \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i} = \\ &= \frac{1}{2} (i_{1a}, i_{1b}, i_f) \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_m \sin \theta \\ 0 & 0 & L_m \cos \theta \\ -L_m \sin \theta & L_m \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_f \end{pmatrix} = \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{2} (i_{1a}, i_{1b}, i_f) \begin{pmatrix} -L_m i_f \sin \theta \\ L_m i_f \cos \theta \\ -L_m i_{1a} \sin \theta + L_m i_{1b} \cos \theta \end{pmatrix} = L_m i_f (-i_{1a} \sin \theta + i_{1b} \cos \theta)$$

Рівняння для потокозчеплень



$$\Psi = L(\theta)\mathbf{i} \quad (3.6)$$

з урахуванням (3.2) набуває вигляду

$$\begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_f \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_m \cos \theta \\ 0 & L_1 & L_m \sin \theta \\ L_m \cos \theta & L_m \sin \theta & L_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{i}_f \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

де  $\mathbf{i}_1 = (i_{1a}, i_{1b})^T$ ,  $\Psi_1 = (\Psi_{1a}, \Psi_{1b})^T$  – вектори струму та потокозчеплення статора.

Узагальнене рівняння електричної рівноваги статорного кола у формі Кірхгофа визначається:

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \quad (3.8)$$

При цьому вектор потокозчеплення статора дорівнює

$$\Psi_1 = \begin{pmatrix} \Psi_{1a} \\ \Psi_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + L_m i_f \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (3.9)$$

де  $\mathbf{R}_1 = \text{diag}(R_1, R_1)$  – матриця активних опорів статора.

Після підставлення (3.9) в (3.8) отримаємо

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_{1a}}{dt} \\ \frac{di_{1b}}{dt} \end{pmatrix} + L_m i_f \begin{pmatrix} -\omega \sin \theta \\ \omega \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Якщо повний момент інерції механічної системі  $J$  постійний, то динамічна модель електромеханічного об'єкта буде отримана з (3.5), (3.10) у вигляді:

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{1}{J} [k_M (-i_{1a} \sin \theta + i_{1b} \cos \theta) - M_c] \\ \dot{i}_{1a} &= L_1^{-1} (u_{1a} - R_1 i_{1a} + L_m i_f \omega \sin \theta) \\ \dot{i}_{1b} &= L_1^{-1} (u_{1b} - R_1 i_{1b} - L_m i_f \omega \cos \theta) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Де  $k_M = L_m i_f = \text{const}$  – коефіцієнт моменту,

$M_c$  – момент навантаження .

Отримуємо математичну модель явнополюсного синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів, записану в стаціонарній системі координат статора (a–b).

Для перетворення змінних до системи координат ротора (d–q), орієнтованою за вектором  $\dot{i}_f$  , струми та напруги статора приймуть вигляд:

$$\begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} = e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} = e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix}$$

рівняння (3.12) набувають вигляду

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_n L_m \dot{i}_f i_{1q} - M_c \right) \\ \dot{i}_{1d} &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1d} + p_n \omega i_{1q} + \frac{1}{L_1} u_{1d} \\ \dot{i}_{1q} &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1q} - p_n \omega i_{1d} - \frac{L_m}{L_1} \dot{i}_f p_n \omega + \frac{1}{L_1} u_{1q} \end{aligned} \quad (3.14)$$

### 3.3 Розрахунок параметрів електричної машини

В даному підрозділі ми проведемо розрахунки основних параметрів генератора для дослідження за допомогою моделі у програмному середовищі Matlab. Розрахуємо при номінальних даних механічних та електричних параметрів генератора.

Вихідні дані для розрахунку параметрів синхронного генератора приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Паспортні характеристики генератора P21R 80 [9]

Параметр генератора	Значення
Номінальна потужність/Rated output	$P_{2n} = 1кВт$
Номінальна лінійна напруга статора/Voltage	$U_{1n} = 335В$
Число пар полюсів/ Number of pole pairs	$p_n = 3$
Момент інерції/Motor moment of inertia	$J = 0.00175_{кг} \cdot м^2$
Коефіцієнт корисної дії/Efficiency	$\eta = 0.805$
Коефіцієнт потужності/Power factor	$\cos \phi = 0.99$
Номінальний момент/Torque	$M_n = 8.6 Н \cdot м$
Критичний момент/Max. torque(2 min)	$M_k = 21 Н \cdot м$
Номінальне діюче значення фазного струму статора/Rated current	$I_n = 2.3А$
Номінальна частота напруги статора/Rated frequency	$f = 50 Гц$
Синхронна частота обертання/Rated speed	$n_c = 1000 об / хв$
Напруга холостого ходу/No load voltage at speed 1000 r.p.m.	$U_{xx} = 295В$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора/Leakage reactance	$x_l' = 4.7$
Активний опір статора/Phase resistance at 20°C	$R_l' = 10.7$
Індуктивності намагнічуючого контуру /Magnetising inductance	$L_m = 0.025$
Індуктивності розсіювання статора/Leakage inductance	$L_{l\sigma} = 0.015$
Індуктивний опір магнітопроводу/Magnetising reactance	$x_\mu = 7.9$

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)}, \quad (3.15)$$

Швидкість холостого ходу СД:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{3} = 104.6 \text{ (рад/с)}, \quad (3.16)$$

Номінальний момент СД:

$$M_H = 8.6 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (3.17)$$

Критичний момент СД:

$$M_k = 21 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (3.18)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{335}{\sqrt{3}} = 193 \text{ (В)}, \quad (3.19)$$

$$I_n = 2.3 \text{ (А)}, \quad (3.20)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 193 = 273 \text{ (В)}, \quad (3.21)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 2.3 = 3.25 \text{ (А)},$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{273}{314} = 0.87 \text{ (Вб)}, \quad (3.22)$$

Індуктивності розсіювання статора:

$$L_{1\sigma} = 0.015 \text{ (Гн)}, \quad (3.23)$$

Індуктивності намагнічуючого контуру:

$$L_m = 0.025 \text{ (Гн)}, \quad (3.24)$$

Індуктивності статорного кола:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.015 + 0.025 = 0.04 \text{ (Гн)}, \quad (3.25)$$

Коефіцієнт моменту розраховуємо за формулою:

$$k_m = \frac{M_n}{I_n} = \frac{8.6}{2.3} = 3.74, \quad (3.26)$$

Струм фіктивного джерела струму визначимо через коефіцієнт моменту:

$$\psi = \frac{2 \cdot k_m}{3 \cdot p_n} = 0.5867 \text{ (Вб)}, \quad (3.27)$$

$$i_f = \frac{\psi}{L_m} = \frac{0.541}{0.025} = 23.47 \text{ (А)}, \quad (3.28)$$

або

$$\psi = \frac{\frac{EMF1000}{\sqrt{3}}}{\frac{\pi \cdot 1000 \cdot p_n}{30}} = \frac{295}{314} = 0.5495 \text{ (Вб)}, \quad (3.29)$$

$$i_f = \frac{\psi}{L_m} = \frac{0.541}{0.025} = 21.97 \text{ (А)}.$$

Результати розрахунків параметрів генератора P21R 80 зведені до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні параметри розрахунків СД P21R 80

Параметр	Величина	Параметр	Величина
$P_{2n}, \text{кВт}$	1	$R_1, \text{Ом}$	10.7
$\omega_{xx}, \text{рад / с}$	104.6	$L_1, \text{Гн}$	0.04
$\omega_{0n}, \text{рад / с}$	314	$L_m, \text{Гн}$	0.025
$M_n, \text{Нм}$	8.6	$J_d, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0.00175
$M_k, \text{Нм}$	21	$p_n$	3
$\eta$	0.805	$\cos \phi$	0.9

### 3.4 Структура векторного керування електричною машиною

Система керування ВЕУ має три головні частини: модель вітрової турбіни на яку подають сигнали вітру, модель СГ та системи керування.

Система керування має дві зони роботи. Перша – це зона роботи при швидкостях вітру, які підтримують номінальну вихідну потужність турбіни. Друга – це зона роботи системи при швидкостях вітру, які генерують потужність турбіни вище номінальної.

Розрахуємо сумарний момент інерції системи генерування:

$$J_{\Sigma} = J_m + J_{ред} + J_{ген}, \quad (3.30)$$

де  $J_{ген}$  – момент інерції генератора, відомий та рівний 0.04 ;

$J_{ред}$  – момент інерції редуктора приймемо рівним 0.032 ;

$J_m$  – момент інерції турбіни.

Момент інерції вітроколеса:

$$J_m = i \cdot J_{лон}, \quad (3.31)$$

де  $i$  – кількість лопатей турбіни.

Момент інерції лопаті визначається як

$$J_{лон} = k_j \cdot m \cdot L^2, \quad (3.32)$$

де  $m$  – маса лопаті, кг;

$k_j$  – коефіцієнт визначений в межах 0.18 – 0.22 ;

$L$  – довжина лопаті.

Бо діаметр турбіни значно перевищує діаметра ротора генератора та момент інерції лопатей грає значну роль при розрахунку сумарного моменту інерції

Напишемо рівняння, що об'єднає масу та довжину лопаті:

$$m = L^{2.62} = 0.75^{2.62} = 0.470 \text{ (кг)}, \quad (3.33)$$

Звідси момент інерції однієї лопаті та всієї турбіни дорівнює:

$$J_{\text{лон}} = k_j \cdot m \cdot L^2 = 0.18 \cdot 0.47 \cdot 0.75^2 = 0.48, \quad (3.34)$$

$$J_m = i \cdot J_{\text{лон}} = 3 \cdot 0.48 = 1.44, \quad (3.35)$$

Отже, сумарний момент системи ВЕУ дорівнює:

$$J_{\Sigma} = J_m + J_{\text{ред}} + J_{\text{ген}} = 1.44 + 0.032 + 0.04 = 1.512. \quad (3.36)$$

Запишемо модель синхронного двигуна з постійними магнітами в координат ротора ( $d - q$ ) має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - v\omega - M_c), \quad M = \mu_2(i_d)i_q, \\ \dot{i}_q &= \frac{1}{L_q} (-R_i i_q - L_d \omega p_n i_d - \psi_m \omega p_n + u_q), \\ \dot{i}_d &= \frac{1}{L_d} (-R_i i_d + L_q \omega p_n i_q + u_d), \end{aligned} \quad (3.37)$$

де  $L_d, L_q$  – індуктивності статора в системі координат ( $d - q$ ),

$$\mu_2(i_d) = \frac{3}{2} p_n (\psi_m + (L_d - L_q) i_d). \quad (3.38)$$

де  $\psi_m = \text{const}$  – потік постійних магнітів.

Алгоритм векторного керування СДПМ має вигляд [8]:

Регулятора струму по осі  $d$ :

$$\begin{aligned} u_d &= R i_d^* - \omega p_n L_q i_q + L_d (\dot{i}_d^* - k_{il} \tilde{i}_d - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (3.39)$$

Регулятор швидкості:

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu'(i_d)} (\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_\omega \tilde{\omega}), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

де  $\hat{M}_c$  – оцінене значення компоненти моменту навантаження  $\frac{M_c}{J}$ ,  $\tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c$  – похибка оцінювання моменту навантаження,  $k_\omega > 0$ ,  $k_{\omega i} > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості,

$$\mu'(i_d) = \frac{3}{2} \frac{p_n}{J} [\Psi_m + (L_d - L_q) i_d] > 0. \quad (3.41)$$

Нелінійні регулятори струму по осі q

$$\begin{aligned} u_q &= R i_q^* + \omega p_n L_d i_d + \omega p_n \Psi_m + L_q (\dot{i}_{q1}^* - k_i \tilde{i}_q - x_q), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (3.42)$$

де відома компонента похідної струму  $i_q^*$  дорівнює :

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu'(i_d)} (\dot{\hat{M}}_c + \frac{v}{J} \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^*) - \frac{3}{2} \frac{p_n}{J \mu^2(i_d)} \dot{i}_d^* (\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_\omega \tilde{\omega}) \\ &\quad (L_d - L_q) - \frac{k_\omega}{\mu'(i_d)} (-(k_\omega + \frac{v}{J}) \tilde{\omega} + \mu'(i_d) \tilde{i}_q + \frac{3}{2} \frac{p_n}{J} (L_d - L_q) \tilde{i}_d \tilde{i}_q). \end{aligned} \quad (3.43)$$

В таблиці 3.3 представлені потрібні для моделювання коефіцієнти регуляторів.



Таблиця 3.3 – Значення коефіцієнтів регуляторів

<i>Параметри</i>	<i>Значення</i>
Коефіцієнт регулятора струму	$k_i = 500; k_{ii} = \frac{k_i^2}{2}$
Коефіцієнт регулятора швидкості	$k_w = 50; k_{wi} = \frac{k_w^2}{2}$
Коефіцієнт регулятора напруги	$k_v = 0.5; k_{vi} = 5$

### Висновки з розділу 3

1. На початку було отримано уявлення про систему керування вітряною турбіною. А саме призначення, функціональні елементи та функції контролера вітряної електростанції.

2. Представлено математичну модель явнополюсного СГ зі збудженням від постійних магнітів в стаціонарній системі координат статора (a–b) та рівняння перетворення змінних до системи координат ротора (d–q), для подальшого моделювання механічної частини системи генерування.

3. Обрані та розраховано основні параметри СГ типу СД Р21R 80 з потужністю 1кВт, які будуть використовуватись для дослідження розробленої системи. Описана математична модель вітрової турбіни.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ГЕНЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ

### 4.1 Дослідження системи генерування

Досліджуємо роботу системи при швидкостях вітру  $V_w = [5(м/с), 9.5(м/с), 3.5(м/с)]$ .

На рисунку 4.1 можна побачити завдання вхідної швидкості вітру та відпрацювання траєкторії кутової швидкості турбіни. З графіку видно, що швидкістю вітру спочатку  $5(м/с)$ , через  $3(с)$  швидкість вітру зростає до  $9.5(м/с)$ , в  $6(с)$  швидкість зменшується до  $3.5(м/с)$ .

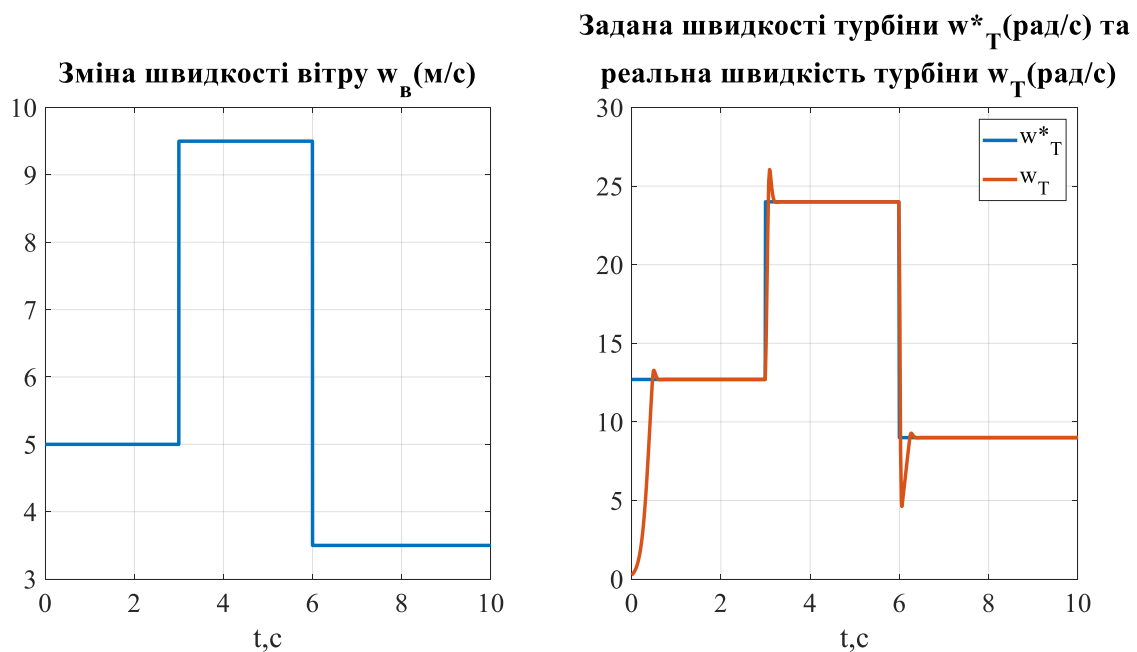
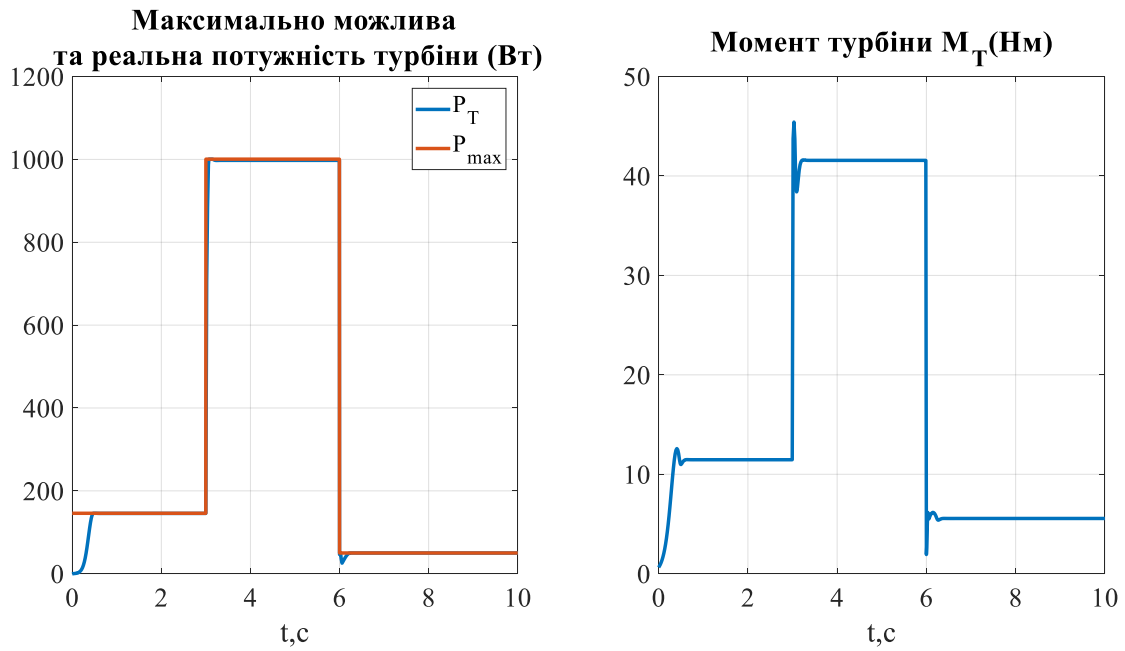


Рисунок 4.1 – Графіки завдання швидкості вітру та відпрацювання швидкості турбіни

Рисунок 4.2 – Графіки перехідних процесів  $P_T$  та  $M_T$ 

З графіку потужності турбіни можна побачити, що при низьких швидкостях вітру реальна потужність  $P_T$  дуже схожа до максимальної потужності, яку може видати турбіна. При досягненні швидкості  $9.5(м/с)$  потужність приближається до номінальної в  $1(кВт)$ , на швидкостях  $5(м/с)$  видає  $150(Вт)$ ,  $3.5(м/с) - 50(Вт)$ .

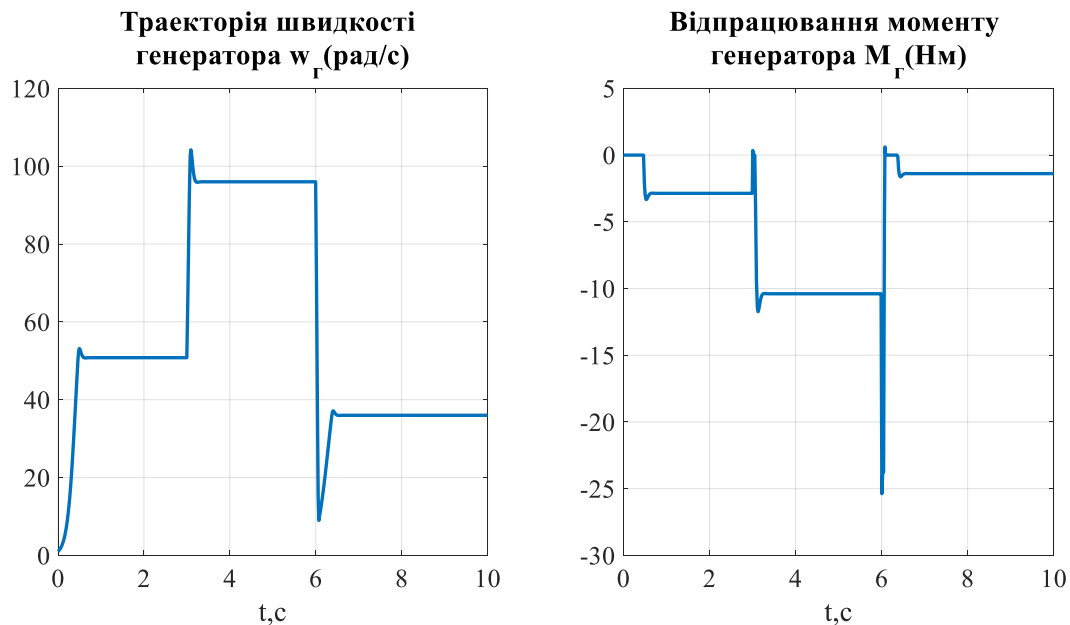


Рисунок 4.3 – Графіки відпрацювання швидкості та моменту генератора

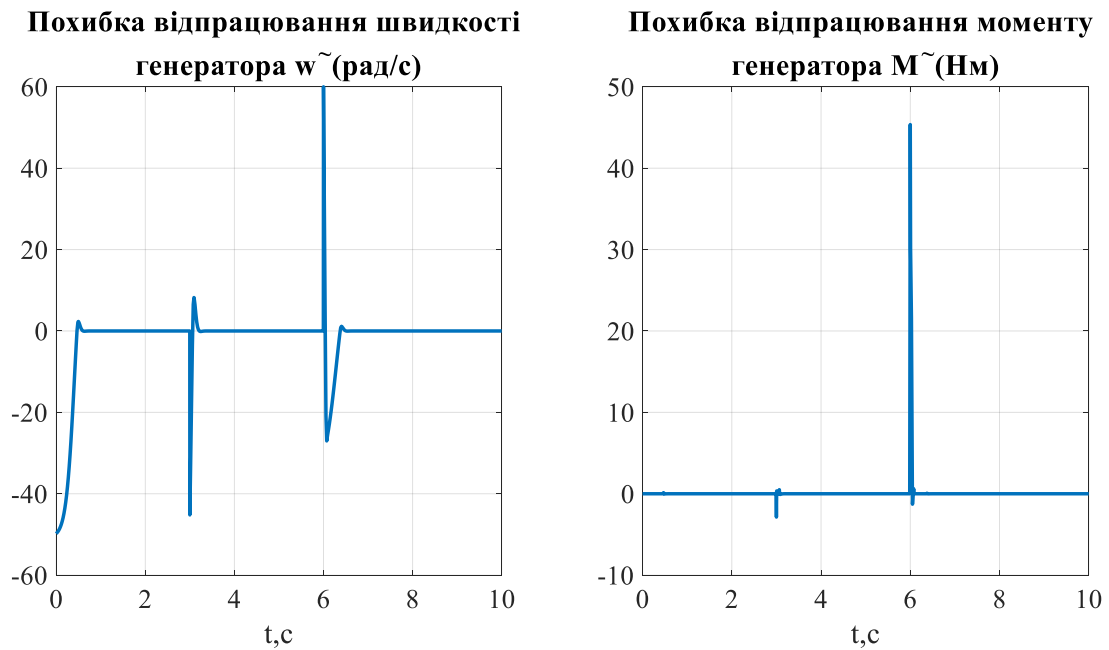


Рисунок 4.4 – Похибки відпрацювання швидкості та моменту генератора

Траєкторія швидкості генератора відпрацьовується з невеликою динамічною похибкою в  $50(\text{рад} / \text{с})$  та  $60(\text{рад} / \text{с})$ . Також видно, що в системі відсутня статична похибка по швидкості.

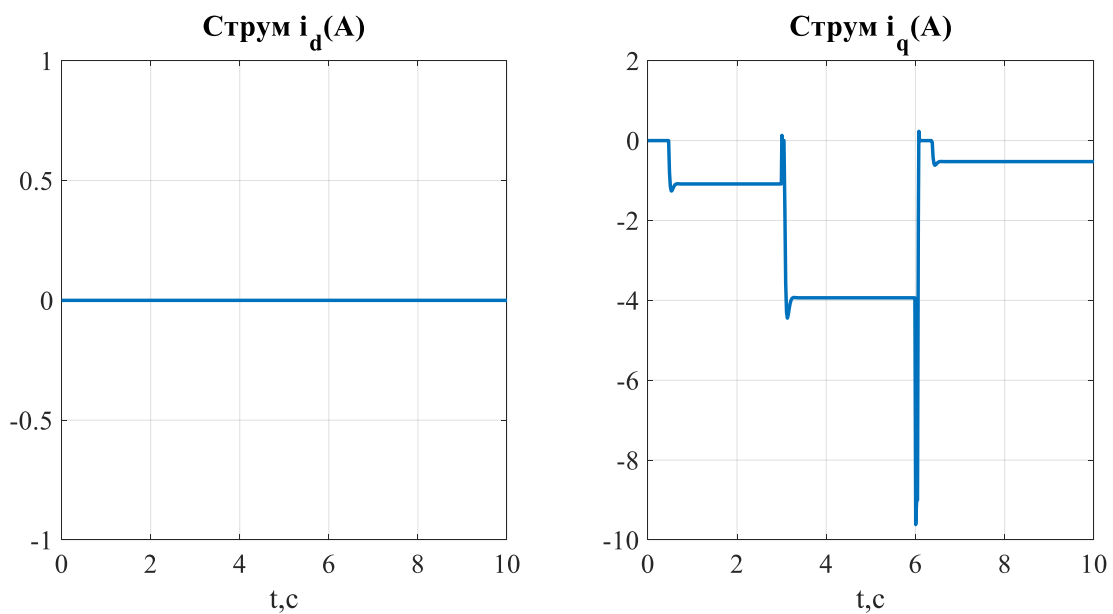


Рисунок 4.5 – Графік складових струму  $i_d$  та  $i_q$

Отримуємо, що значення струму не перевищує максимальне.

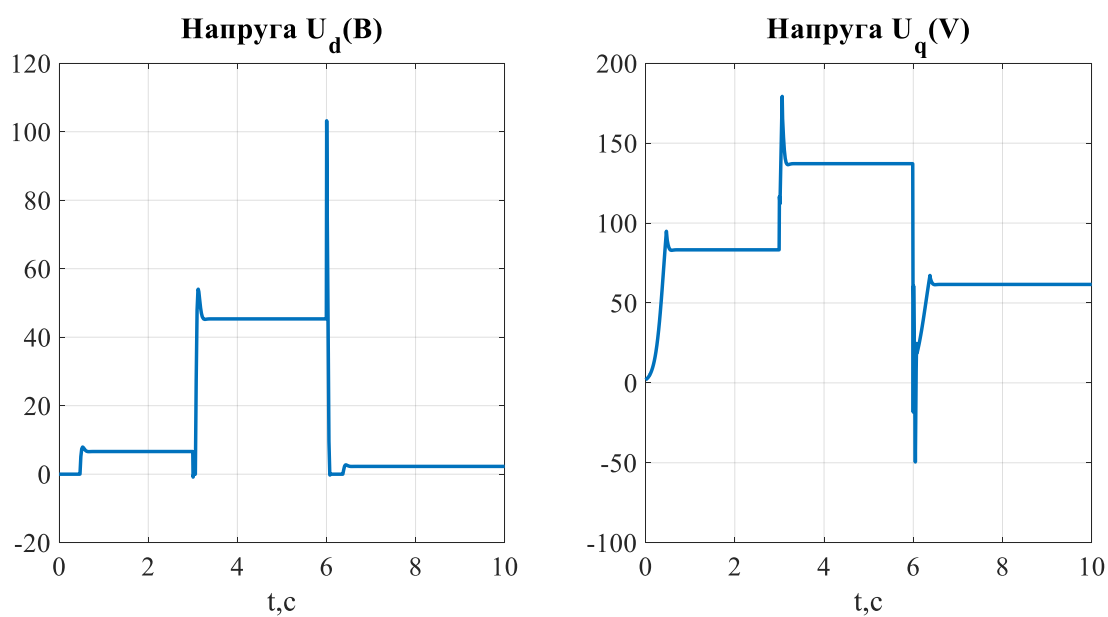
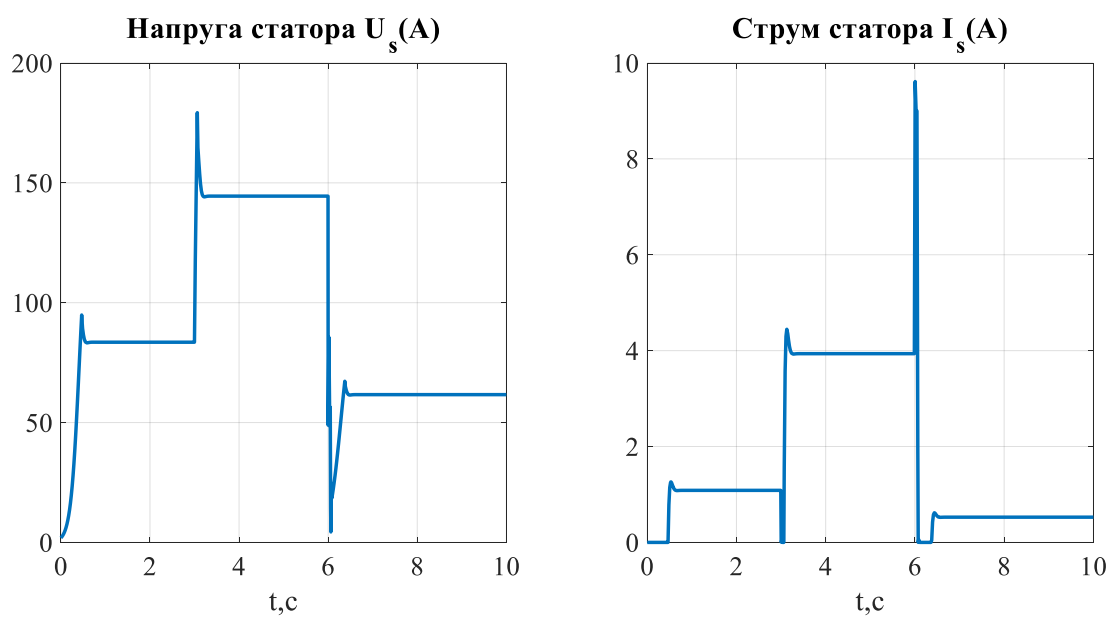
Рисунок 4.6 – Графік напруги  $u_d$  та  $u_q$ 

Рисунок 4.7– Графік напруги та струму статора

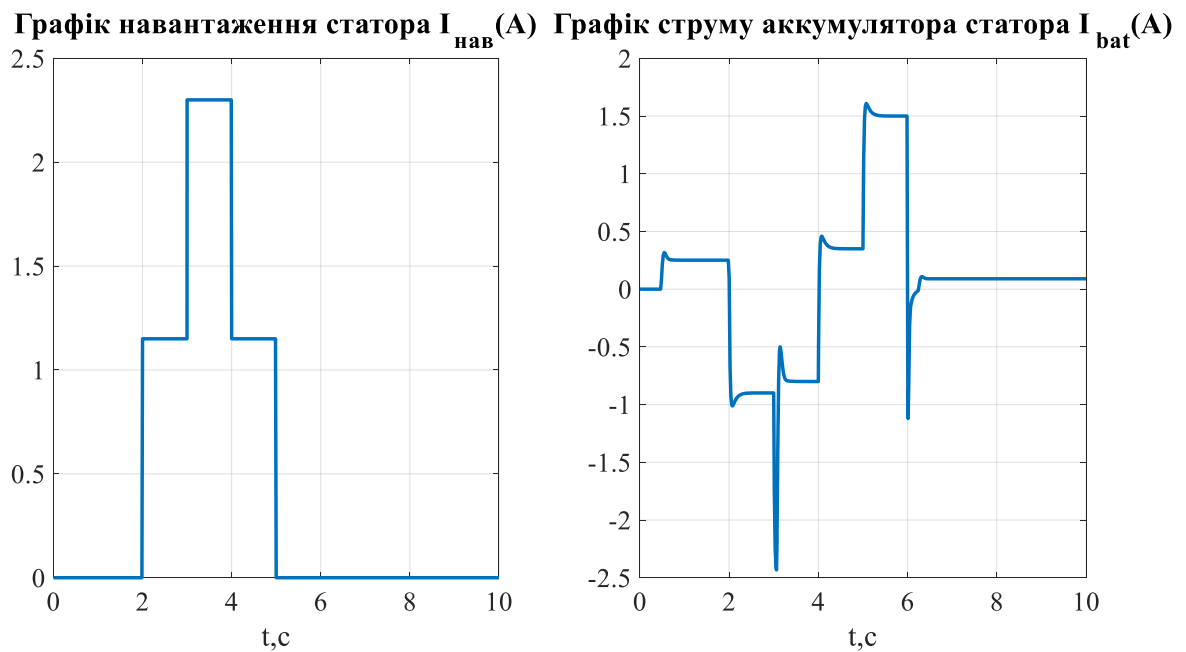


Рисунок 4.8 – Графік струму навантаження  $I_{\text{load}}$  та струму батареї  $I_{\text{batt}}$

Навантаження маємо  $I_{\text{load}} = 0.5 \cdot I_{\text{ном}} = 1.15(\text{А})$ . З графіку струму батареї бачимо, що при накиданні навантаження батарея розряджаються, при скиданні за рахунок батарея бере заряд від надлишку потужності.

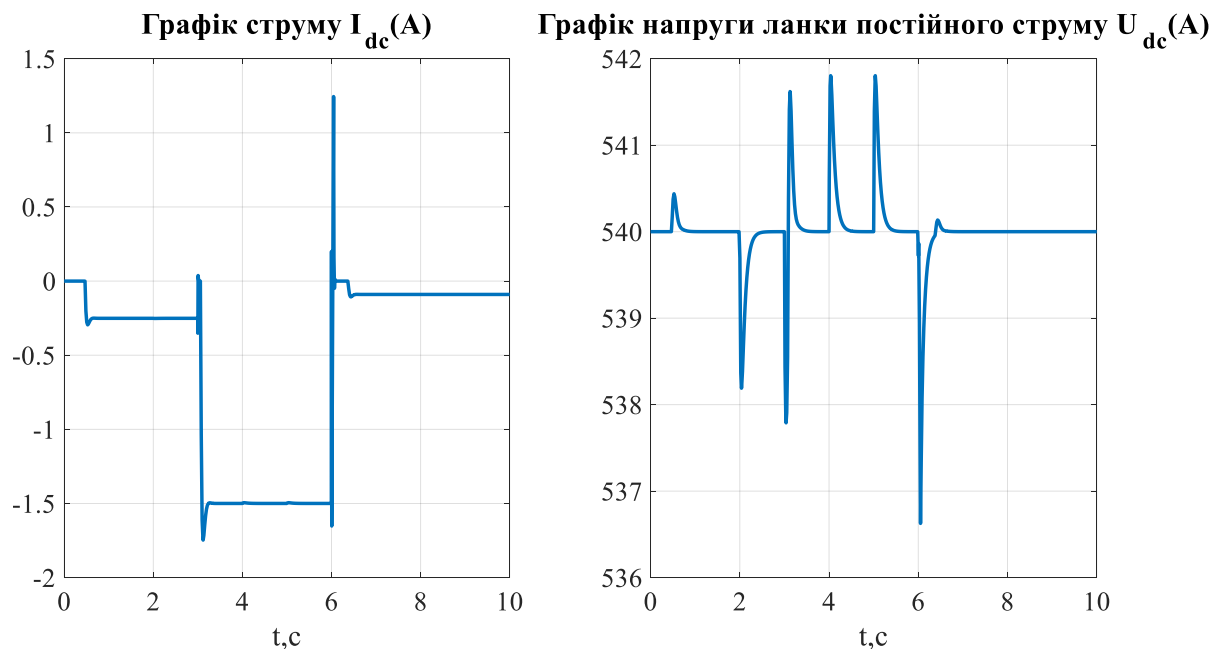


Рисунок 4.9 – Графік струму  $I_{\text{dc}}$  та напруги ланки постійного струму  $U_{\text{dc}}$

При цьому  $U_{\text{dc}}$  має невеликі стрибки напруги в межах  $2-5(\text{В})$ , та стабілізується до номінальної  $U_{\text{dc}} = 540(\text{В})$ .

Струм  $I_{dc}$  не перевищує струм  $I_n$ .

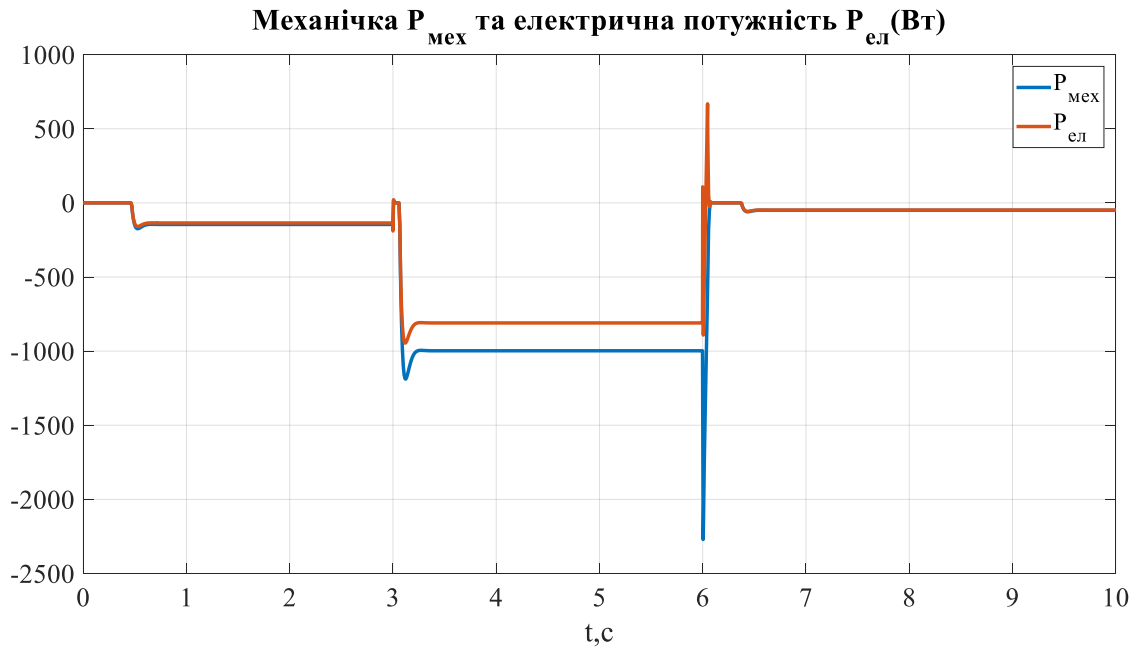


Рисунок 4.10 – Механічна та електрична потужності системи

З отриманого графіку потужності генератора, можна зробити висновок, що при низькій швидкості втрати в генераторі більші.

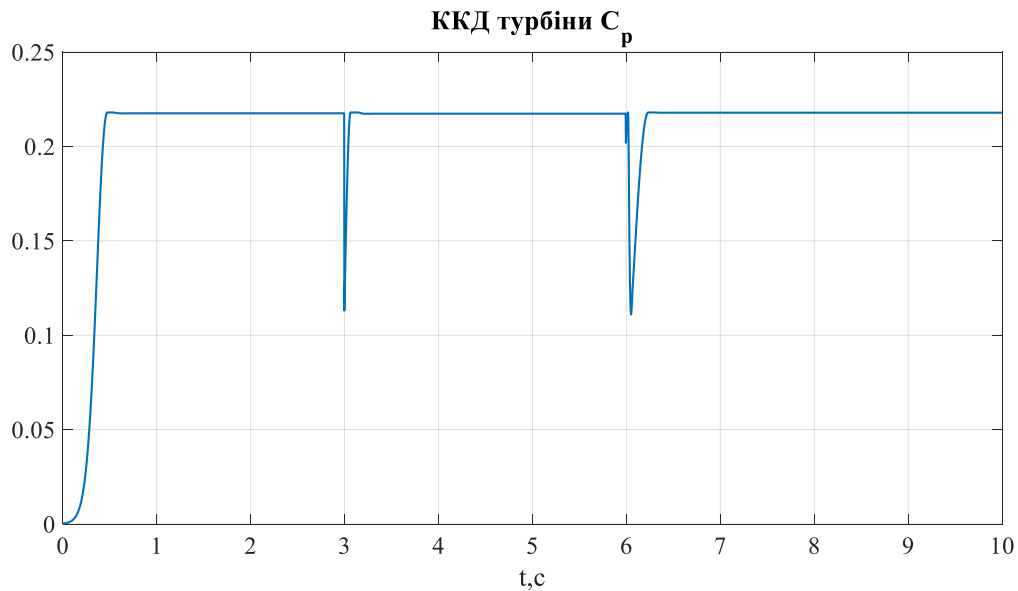


Рисунок 4.11 – ККД турбіни

## Висновки з розділу 4

1. Задана траєкторія швидкості турбіни відпрацьовується та швидкість турбіни тримається прийнятною, щоб досягти максимальної потужності турбіни.

2. З графіку швидкості генератора можна побачити, що швидкість стабілізується і тримається на прийнятному рівні, а з графіку моменту момент генератора не перевищує критичний момент. В системі відсутня статична похибка по швидкості.

3. Напруга в ланці постійного струму має невеликі стрибки напруги  $2 - 5(V)$ . Регулятор напруги стабілізує її до значення  $U_{dc} = 540(V)$ . Струм ланки постійного струму при збільшенні швидкості вітру збільшується, але не перевищує номінальний струм.

4. Можемо зробити висновок, що система працює в режимі регулювання швидкості завдяки якому турбіна працює з максимальною ефективністю.



## 5 СИЛОВА ЧАСТИНА – РОЗРОБКА СХЕМИ КЕРУВАННЯ

Системи автономного живлення від вітряного генератора складається:

1. Генератор.
2. Перетворювач.
3. Контролер заряду і акумуляторні батареї.
4. Інвертор.

Таблиця 5.1 – Вихідні данні розрахунку

Параметр	Значення
Напруга акумуляторної батареї $U_{AKB}, B$	12
Номінальна потужність $P_{2n}, кВт$	1
ККД інвертора $\eta_{ин.}, \%$	0.805
Номінальне значення струму статора $I_n, H \cdot м$	2.3
Можливий час роботи від АКБ $H, годин$	12
Напруга ланки постійного струму $U_{dc}, B$	540

### 5.1 Розрахунок блоку акумуляторного пристрою вітряної установки

#### 5.1.1 Розрахунок ємності акумулятора

Розрахуємо час автономної роботи 12 годин.

Визначимо струм розрядки акумулятора:

$$I_{роз.АКБ} = \frac{P_{пик.}}{U_{АКБ} \cdot \eta_{ин}} = \frac{1000}{12 \cdot 0.805} = 103.5 (A). \quad (5.1)$$

де  $I_{роз.АКБ}$  – струм розрядки акумуляторної батареї;

$P_{пик.}$  – пікова потужність, Вт;

$U_{АКБ}$  – напруга АКБ, В;

$\eta_{ин.}$  – ККД інвертора, %.

Ємність акумуляторної батареї дорівнює:

$$C_{АКБ} = I_{ном} \cdot H = 2.3 \cdot 12 = 27.3 (A \cdot год) \quad (5.2)$$

Розрахуємо кількість послідовних акумуляторів, які потрібно буде розмістити в одній паралельній ланці:

$$N_{\text{гілки}} = \frac{U_{\text{dc}}}{U_{\text{АКБ1}}} = \frac{540}{12} = 45. \quad (5.3)$$

За отриманими даними підберемо 45 акумуляторних батарей MERLION GP12330M6 з ємністю 33 (А·год).

Таблиця 5.1 – Акумуляторна батарея MERLION GP12330M6 [10]

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Тип акумулятора	AGM
Ємність акумулятора	33 (А / ч)
Напруга	12.0 (В)

### 5.1.2 Вибір контролера заряду/розряду акумуляторної батареї

Для проектуванні АКБ використовують плату BMS (Battery management system). Основні задачі застосування BMS в якості регулятора роботи акумуляторної батареї:

- електричні батареї захищені від пошкоджень;
- значне збільшення терміну використання батареї;
- збереження акумулятора в такому стані, щоб виконувались всіх покладені на нього завдання.

BMS запобігає небезпечні для АКБ процеси шляхом впливу на неї або ж подачі відповідного сигналу. При виході хоча б одного з робочих параметрів за межі допустимого діапазону, система інтелектуального моніторингу (BMS) відключає АКБ від навантаження або зарядного пристрою

Для нашої системи було обрано контролер BMS LiPo LifePO4 40s-234s 100A-1000A 140v-750v [11].

- Струм розрядки: 100-1000A
- Напруга зарядки: 12-750 В

## 5.2 Розробка силовій частини перетворювача

Використовуючи параметри підбраного генератора P21R 80 G6 (табл. 3.2) робимо розрахунки силовій частини системи керування вітрогенератора.

### 5.2.1 Розрахунок ланки постійного струму

Розрахунок номінального значення струму ланки постійного струму:

$$I_{dc} = \frac{\lambda \cdot P_n}{U_{DC} \eta_{инв}} = \frac{2.4 \cdot 1 \cdot 10^3}{540 \cdot 0.805} = 5.52(A), \quad (5.4)$$

де  $\lambda = \frac{M_{max}}{M_n} = \frac{21}{8.6} = 2.4$  – перевантажувальна здатність ЕМ.

Напруга на виході АКБ складає  $U_{DCmax} = 540$  (В).

Максимальна зворотна напруга ключів має мінімум бути в 1.5 рази вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму.

$$U_{ce} > 1.5U_{dcmax} \quad (5.5)$$

$$U_{ce} = 1.5U_{DCmax} = 1.5 \cdot 540 = 810 \text{ (В)}. \quad (5.6)$$

### 5.2.2 Розрахунок автономного інвертора

Вибір інвертор робимо знаючи значення пікової потужності енергоспоживання. В системі присутні АКБ для заряджання виробленої електроенергії для подальшого використання споживачем. Саме тому використовуємо автономний інвертор. Його підключають до АКБ, і коли відбувається відключення основного джерела енергії – вмикається живлення від батарей.

Максимальний струм на виході перетворювача рівний максимальному струму двигуна  $I_{\max} = I_{\text{peak}} = 21 \text{ А}$ .

У минулому розділі було обрано вітряну установку, яка видає номінальну  $1 \text{ кВт}$ , за цим значенням можна встановити інвертор EP30-1KW PRO з піковою напругою (20 мс) – 0.5 кВА. Він зможе забезпечити постійне навантаження до 1 кВт. Пристрій призначений для харчування апаратури напругою 220 В з частотою 50 Гц.

Основні технічні характеристики інвертора EP30-1KW PRO представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Характеристики автоматичного інвертора напруги EP30-1KW PRO потужністю 1 кВт[13]

Параметр	Значення
Номінальна потужність	1 кВт
Пікова напруга (20мс)	3 кВА
Форма хвилі	синусоїда
Номінальна вихідна напруга	220В $\pm$ 10%
Частота на виході (Гц)	50 $\pm$ 0.3
Піковий ККД інвертора	> 88%
Граничний ККД інвертора	> 95%
Стандартний час перемикання (мс)	10
Напруга (В)	230
Діапазон напруги (В)	155 ~ 280
Частота (Гц)	40 ~ 80
Вихідна напруга	від типу АКБ
Сила змінного струму спрацьовування АЗ	10А
Захист від перезаряду (В)	31.4
Максимальний зарядний струм (А)	35
Форма вхідного змінного струму.	синусоїда
Номінальна частота (Гц)	50
Захист від перевантаження	вимикач
Захист від КЗ на виході	вимикач
Макс. струм байпаса	30Аmp
Вага нетто (кг)	16.5
Діапазон робочих температур (° С)	0-40
Шум (max)	60dB
Дисплей	LED + LCD

### 5.2.3 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторного фільтра

Розрахуємо опір для заряду конденсаторного фільтра:

$$R_3 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{5.52} = 98(\text{Ом}). \quad (5.7)$$

Ємність визначається за формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot k_n \cdot p_n \cdot f \cdot R_3}, \quad (5.8)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт пульсацій рівний  $(0.02 \div 0.05)$ .

Тоді ємність фільтра випрямляча визначається:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.05 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 98} = 216(\text{мкФ}). \quad (5.9)$$

Обираємо конденсатор SAMWHA з ємністю 860 мкФ та напругою 200 В [14]. Підключаємо три конденсатори послідовно, отримуючи шукане значення напруги та ємності:

$$C = \frac{680}{3} = 226(\text{мкФ}). \quad (5.10)$$

Потрібно буде по три конденсатори ємністю 860 мкФ кожен.

### 5.2.4 Розрахунок та вибір давачів струму, напруги, кутової швидкості та швидкості вітру

Вибір датчика струму може бути здійснений по розрахованому значенню  $I_{dc}$ . А саме обираємо ACS758LCB з номінальним струмом 50 А і діапазоном вимірювання 0-100 А [17].

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25NP, підключення якого показана на рисунку 5.1.

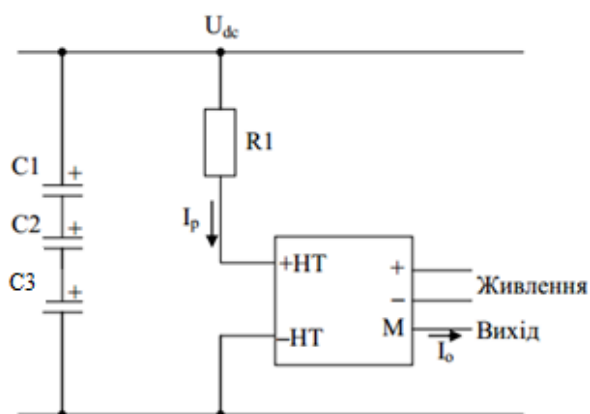


Рисунок 5.1 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола складає  $I_{p\max} = 14 \text{ мА}$ . Тому значення резистору  $R_1$  дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{DC}}{I_{p\max}} = \frac{600}{14 \cdot 10^{-3}} = 42\,857 (\text{Ом}) \quad (5.12)$$

Обираємо резистор з стандартного ряду АНР250W-47RF з опором  $R_1 = 47 \text{ кОм}$ , параметри якого взяті з [18].

Обираємо як давач швидкості інкрементальний енкодер ХСС1510PS10Y, параметри якого можна побачити в табл. 5.3

Таблиця 5.3 Параметри енкодера ХСС1510PS10Y [19]

Параметр	Значення
Максимальна швидкість обертання	9000 об/хв
Діаметр	58 мм
Живлення напруги	5...30 В DC
Споживання енергії	40 мА
Максимальна частота підрахунку	300 КГц

Використаємо анемометр MTN663591 в якості давача швидкості вітру

Таблиця 5.4 – Паспортні характеристики MTN663591 [20]

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Вихідний струм	8 мА
Діапазон вимірювання	0.7-40 м / с
Точність	$\pm 3\%$
Відстань передачі	$> 1000$ м
Робоча температура	-25 ~ 60
Напругу живлення	18 В

### 5.3 Розробка системи керування на базі контролера

#### 5.3.1 Вибір контролера для системи керування

В якості мікроконтролер обираємо TMS320F28335 з сайту Texas Instruments [21].

Таблиця 5.5 – Технічні характеристики TMS320F28335

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Частота	150 МГц
CPU	32-біт
Пам'ять	516 кб флеш 68 кб RAM
Живлення	3.3 В
Струм споживання	20 мА
Watchdog timer	присутній
ШІМ піни	12 каналів
Інтерфейс енкодера	2 Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) модуля
Захист програми	128-біт ключ або пароль безпеки

## Продовження таблиці 5.5

Параметр	Значення
Аналогові піни	16 каналів, 12-біт, аналогово-цифрового перетворення (АЦП)
Комунікаційні порти	2 SCI, 1 SPI, I2C, 2 McBSP, 2 CAN
Піни I/O	88 піни індивідуально програмованих
Периферія	Покращена периферія керування
Робоча температура	-40 – 125 °C

Обраний контролер має потрібні 12 каналів ШІМ, 16 аналогових пінів для підключення датчиків струму та напруги ізолюючих елементів, енкодерний інтерфейс та інтерфейс зв'язку з системами вищого порядку, що задовольняє вимоги до керуючого контролера.

### 5.3.2 Вибір блоку живлення

Блок живлення на виходи має 24 В, для перетворення в 15 В підключимо мікросхему LM7815 для живлення датчиків та ШІМ. Для живлення керуючого контролера та енкодера перетворимо напругу з 15В на 5В, підключимо мікросхеми LM7805 [23]. Підключення мікросхеми серії LM7815 та LM7915 наведено на рис. 5.6 наведено на рис. 5.3.



Рисунок 5.2 – Перетворювач серії MEANWELL RD-35B



Таблиця 5.6 – Технічні харатеристик MEANWELL RD-35B

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Вхідна напруга, змінна, В:	від 85 до 264
Вихідна напруга, В	24
ККД, %	81
Номінальний вихідний струм, А	1.5
Номінальна потужність, Вт	35

Таблиця 5.7 – Технічні характеристики LM7805

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Вхідна напруга, В	5 -18
Вихідна напруга, В	5
Максимальний струм, А	1.5

Таблиця 5.8 – Технічні характеристики LM7815

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Вхідна напруга, В	17.5 - 30
Вихідна напруга, В	15
Максимальний струм, А	1.5

Блок живлення на виходи має 24 В, для перетворення в 15 В підключимо мікросему LM7815 для живлення датчиків та ШІМ. Для живлення керуючого контролера та енкодера використовується мікросхема LM7805, яка підключена на вихід мікросхеми LM7815, який перетворює напругу в 5 В. Підключення мікросхеми серії LM7815 та LM7915 наведено на рис. 5.3 наведено на рис. 5.3.

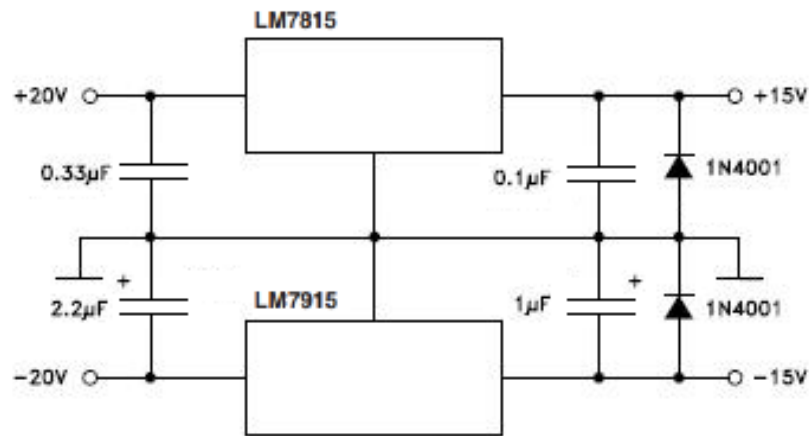


Рисунок 5.3 – Схема підключення мікросхем LM7815 та LM7915

Зменшуємо напругу на виході блоку живлення до 3.3 В, що підключити контролер до нього. Використовуємо мікросхема LF33

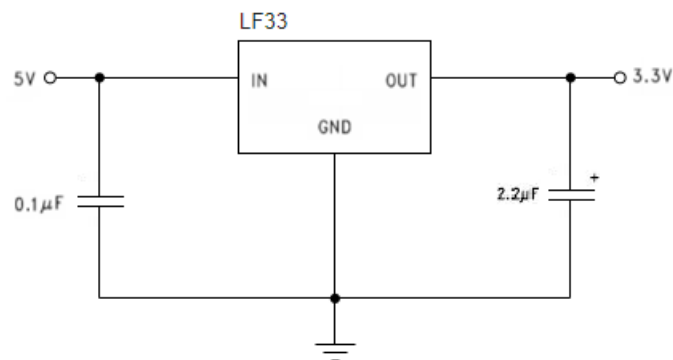


Рисунок 5.4 – Схема підключення мікросхеми LF33

### 5.3.3 Гальванічна розв'язка сигналів контролера

В зв'язку з тим, що давачі та драйвери живляться від 15В, а контролер від 5 В, виконаємо гальванічну розв'язку для в зв'язку. Використаємо мікросхему HCPL-7840, рис. 5.5.

Напруга живлення 5.5 В. Струм мікросхеми 16 мА.

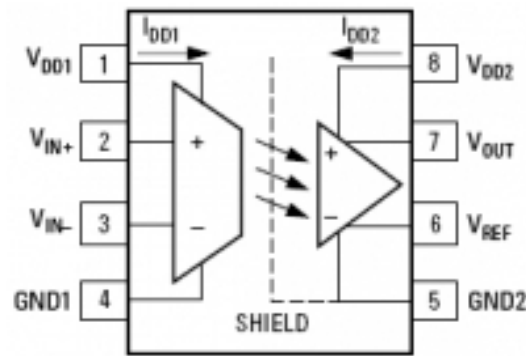


Рисунок 5.5 – Мікросхема HCPL-7840

Щоб розв'язати вихідні ШІМ сигнали від контролера до драйверів використовується NEC PS9302L, рис. 5.6.

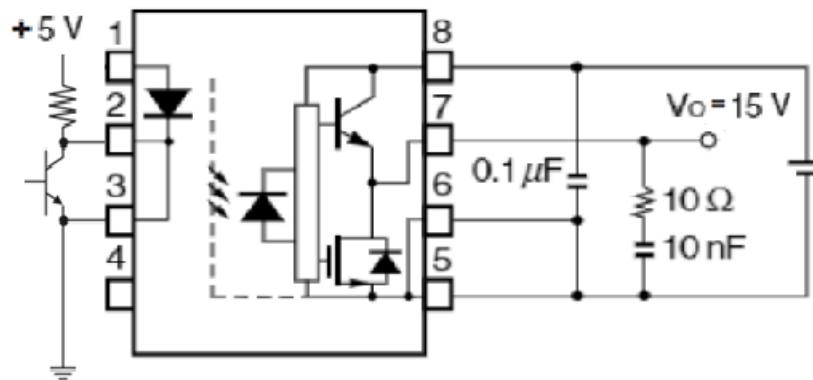


Рисунок 5.6 – Опторозв'язка PS9302L

На 5 В на вході підключається мікросхема NEC PS9302L, на виході 15 В, піковий струм на виході складає 1 А.

### Висновок з розділу 5

1. Розраховано та описано блок BMS. Автономність електропостачання системи забезпечують 45 батарей MERLION GP12330M6 з ємністю 33 ( $A \cdot год$ ).
2. Була розроблена та розрахована силова частина перетворювача та обрано інвертор EP30-1KW PRO.
3. Були розраховані та вибрані основні елементи зарядного кола, а також давачі струму, напруги, енкодер та анемометр. Обрано керуючий контролер TMS320F28335 та блоки живлення елементів схеми.

4. Для гальванічної розв'язки сигналів контролера використовуємо мікросхему HCPL-7840.

.

## ВИСНОВКИ

В представленому дипломному проекту була виконана розробка портативного вітрогенератора на базі синхронної машини. Під час виконання бакалаврській роботи було отримано наступні результати:

1. Виконано аналіз основних типів турбін та конструкції вітрогенераторів. Підібрано та обґрунтовано вибір синхронного генератора з постійними магнітами. Розраховані основні параметри генератору для подальшого використання в моделюванні та розробці схеми керування.

2. Для дослідження та моделювання статичних та динамічних режимів вітрогенератора, було розроблено модель явнополюсного синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів та математичну модель вітроколеса.

3. Дослідження розробленої системи виконано методом математичного моделювання системи векторного керування синхронним двигуна з постійними магнітами. З отриманих результатів, можна побачити, що при відносно малих швидкостях вітру система знаходиться в режимі регулювання швидкості, яка забезпечує максимальну ефективністю вітротурбіни.

4. Для реалізації розробленої схеми керування вітрогенератором було обрано АБК, блок заряду АКБ, конденсатор, перетворювач та інші елементи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вітрогенератори. URL: [https://energo.house/veter/vetrovaya-turbina.html#Obsie\\_pokazateli\\_turbin](https://energo.house/veter/vetrovaya-turbina.html#Obsie_pokazateli_turbin)
2. Вітрогенератори. Пристрій і види. Робота і застосування. URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/vetrogeneratoroy>
3. Основні види вітрогенераторів: вертикальні та горизонтальні. URL: <https://tcip.ru/blog/wind/osnovnye-vidy-vetrogeneratorov-vertikalnye-gorizontálne.html>
4. Каргіл В.М., Мартіросов С.Н., Муругов В.П. Керівництво по застосування вітроустановок малої і середньої потужності. Москва, 2001. Р. 9-20. URL: [http://winder.ua/images/stories/winder/INTERSOLAR\\_rukovodstvo\\_po\\_primene\\_niyu.pdf](http://winder.ua/images/stories/winder/INTERSOLAR_rukovodstvo_po_primene_niyu.pdf)
5. Квитко А. В. Розрахунок потужності і вибір основних функціональних вузлів вітроелектричної установки. Науковий журнал КубГАУ, №98. Краснодар. 2014. Р. 1– 2. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/25.pdf>
6. El Mourabit Youness. Dynamic modeling and control of a wind turbine with MPPT control connected to the grid by using PMSG. 3rd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing. Fez, Morroco, 2017. Р. 1– 3. URL: <http://www.docme.su/doc/2202795/atsip.2017.8075587>
7. M.Shukla. Power Electronics Converters and Wind Turbine. Surat, India, 2017. Р. 2-3. URL: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1702195.pdf>
8. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Теорія мехатронних систем. / НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”. Київ, 2011. 96с.
9. VEM Motors. СДПМ. URL: <https://vecgroup.ru>
10. MERLION. Акумуляторна батарея. URL: <https://220volt.com.ua/akkumulyatornaya-batareya-merlion-gp12330m6-12-v-33ah-6015/>
11. Xebike: Контролер BMS. URL: <https://xebike.com/product/kontroller-zashhity-akkumulyatora-bms-pcm-litij-li-ion-lipo-lifepo4-3-204s-100-1000a-12v-750v/>
12. Пересада С.М., Пушкар М.В. Основи мехатроніки. // НТУУ “КПІ ім. Ігоря

Сікорського”. Київ, 2020. 137 с.

13. XEnergotrade: Автономні інвертори. URL: <https://energotrade.su/inventory/invertor-1kw.htm>
14. SAMWHA. Конденсатори. URL: <https://asenergi.com/catalog/kondensatory-elektroliticheskie/470mkf.html>
15. Резистор HS200-50RF. URL: <https://www.tme.eu/en/details/hs200-50rf/resistors-200w-and-more/arcol/hs200-50r-f/>
16. CHIPDIP. Тиристори. URL: <https://www.chipdip.ru/product/t161-160-14>
17. Давач струму. URL: <https://1wire.com.ua>.
18. TME. Резистори. URL: <https://www.tme.eu>
19. АСТІ-PRO. Інкрементальний енкодер. URL: <http://acti-pro.ru/produktsiya/opticheskie-enkoderyi-schneider-electric-osisense-osicoder-xss/se/xcc1510ps10y.html>
20. Schneider-Electric. MTN663591. URL: <https://download.schneider-electric.com>
21. TMS320F28335. URL: <https://www.ti.com>
22. MEANWELL RD-35B. URL: <https://meanwell.in.ua/>
23. Texas Instruments: Стабілізатори напруги. URL: [ti.com](https://www.ti.com)
24. Датчик напруги. LV 25P. URL: <https://www.lem.com>