

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

### бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Моделювання системи керування вітроелектричною установкою

Виконала: студентка 4 курсу, групи ЕТс-41  
спеціальності 141

електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Кушнеров М.Д.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Наконечний М.С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М. Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Шовкун О.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Тарасенко М. Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« 30 » січня 2023 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Кушнерову Миколі Демидовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання системи керування вітроелектричною установкою

Керівник роботи ... Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «23» січня 2023 року № 4/7-47

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз складу та конструкції вітрогенератора;  
Виконати моделювання розробленої системи вітрогенератора з використанням синхронного генератора з постійними магнітами у середовищі MatLab Simulink

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ
2. Проектно-конструкторський розділ
3. Розрахунковий розділ
4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я., к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т. к.т.н., доц. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 01 лютого 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	26.02.2023	
2	Аналітичний розділ	31.03.2023	
3	Проектно-конструкторський розділ	16.04.2023	
4	Розрахунковий розділ	30.04.2023	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	14.05.2023	
6	Висновки	31.05.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2023	
8	Оформлення графічної частини	14.06.2023	

Студент

(підпис)

Кушнеров М.Д

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Наконечний М.С.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2023.

Стор.55; рис. 35; табл. --; джерел 13; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Моделювання системи керування вітроелектричною установкою».

Мета кваліфікаційної роботи полягає у дослідженні системи керування вітрогенератором та його вплив на ефективність роботи вітрогенератора.

У даній роботі представлені опис вітрогенератора, аналіз стратегії керування вітрогенератором, математичні моделі генераторів. Крім цього, у роботі було удосконалено систему керування струмом генератора, спостерігач крутного моменту для підвищення ефективності роботи вітрогенератора. У розробленій системі вітрогенератора було обрано керований багатополісний синхронний генератор з постійними магнітами із змінною швидкістю (PMSG): Він має більш високу продуктивність за рахунок збільшення ККД і меншого технічного обслуговування, оскільки не має струму ротора. Більше того, PMSG може працювати без редуктора, тобто зменшується вага гондоли та знижуються витрати.

Проведено моделювання розробленої системи керування в MatLab Simulink, виконано аналіз отриманих результатів та показано залежності потужності вітрогенератора від кута атаки та швидкості вітру.

*Ключові слова:* вітрогенератор, система керування, синхронний генератор.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Типи вітрогенератора	7
1.2 Система керування вітрогенератором	9
1.3 Висновки до розділу	15
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	16
2.1 Класифікація системи керування вітрогенераторів	16
2.2 Стратегії керування вітрогенератором	18
2.2.1 Фіксована швидкість та фіксований кут атаки	19
2.2.2 Змінна швидкість та змінний кут атаки	24
2.3 Моделювання системи вітрогенератора	25
2.3.1 Моделювання аеродинамічної віротурбіни	26
2.3.2 Відстеження точки максимальної потужності	27
2.3.3 Моделювання механічної підсистеми	27
2.4 Математична модель синхронного генератора з постійними магнітами	28
2.4.1 Моделювання підсистеми керування кутом атаки	31
2.5 Висновки до розділу	32
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	34
3.1 Регулятор для керування струмом генератора	34
3.1.1 ПІД регулювання для керування струмом генератора	34
3.1.2 ПІ регулювання для керування струмом генератора	36
3.2 Розробка спостерігача крутного моменту	38
3.3 Моделювання розробленої системи керування вітрогенератором	41
3.4 Результат моделювання	45
3.5 Висновки до розділу	46
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	47
4.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж	47

4.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54

## ВСТУП

Актуальність роботи. В даний час зростаючі екологічні проблеми, особливо пов'язані з глобальним потеплінням, спонукали до використання відновлюваних джерел енергії. Вітроенергетика є одним з основних гравців у цьому контексті, і сьогодні це найпоширеніше відновлюване паливо. Вона поступово стає важливою для життя сучасної людини та поступово витісняє традиційні енергії. Для використання вітроенергетики з високою ефективністю вимагає багатьох технологічних удосконалень, а саме систем керування для вітрогенератора.

Наразі використовується широкий спектр технологій вітрових турбін. Ці технології розрізняються за вартістю, складністю, ефективності генерування вітрової енергії, а також обладнання. Типовий вітрогенератор включає лопасті і ступицю ротора для генерування енергії з вітру, зубчасту передачу для збільшення швидкості обертання вала ротора, що повільно обертається до більш високої швидкості, необхідної для приводу генератора, і індукційний генератор в якості електромеханічного пристрою перетворення енергії. Індукційні машини популярні як генеруючі пристрої завдяки своїй асинхронній природі, оскільки підтримання постійної синхронної швидкості для використання синхронного генератора затруднене через змінну природу швидкості вітру. Тому для підвищення ефективності роботи вітрогенератора та підвищення стійкості систем потрібно розробити систему керування вітрогенераторами.

Мета роботи є дослідження системи керування вітрогенератором та його вплив на ефективність роботи вітрогенератора.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі необхідно було:

- провести аналіз складу та конструкції вітрогенератора;
- виконати моделювання системи вітрогенератора;
- удосконалити пропорційно-інтегральне регулювання (ПІ) струму статора генератора та спостерігач крутного моменту;
- виконати моделювання розробленої системи вітрогенератора з використанням синхронного генератора з постійними магнітами у середовищі MatLab Simulink.

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Типи вітрогенератора

Вітрогенератор є механічним пристроєм, спеціально розробленим для перетворення частини кінетичної енергії вітру на корисну механічну енергію. За минулі часи було розроблено декілька конструкцій. Більшість із них складається з ротора, який обертається навколо своєї осі під дією підйомної сили або сили опору, що виникає внаслідок взаємодії з вітром. Залежно від положення валу ротора вітрогенератори поділяються на вертикально-осьові та горизонтально-осьові [1]. На рисунку 1.1 представлений вертикально-осьовий вітрогенератор:

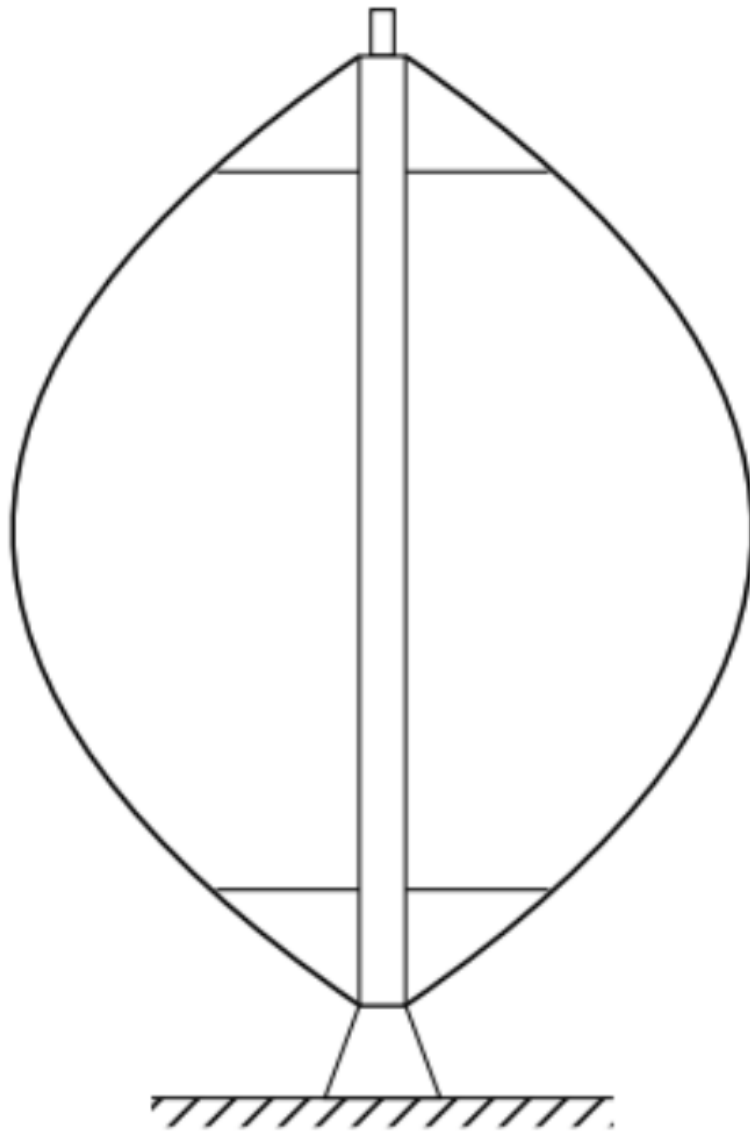


Рисунок 1.1 – Вертикально-осьовий вітрогенератор



На рисунку 1.2 представлений горизонтально-осьовий вітрогенератор:

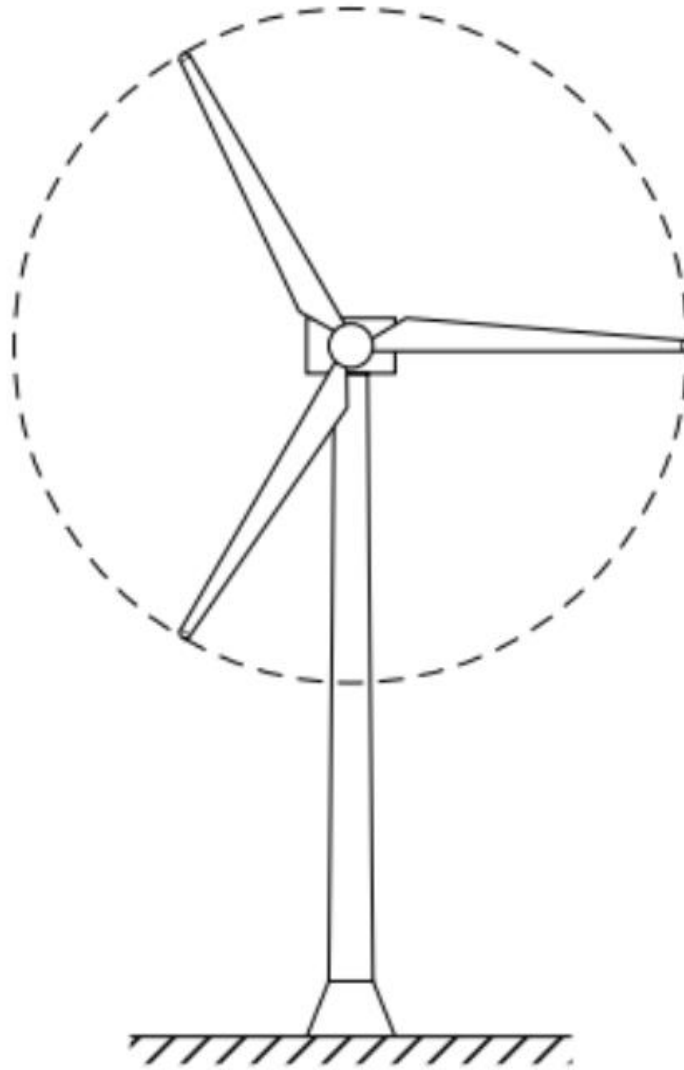


Рисунок 1.2 – Горизонтально-осьовий вітрогенератор

Найбільш успішною вертикально-осьовою вітровою турбіною є ротор Дарр'є, показаний на рисунку 1.1. Найбільш цікавою характеристикою цього типу вітрової турбіни є те, що електрогенератор і передавальні пристрої розташовані на рівні землі. Крім того, вони здатні вловлювати вітер з будь-якого напрямку без потреби нищпорити. Однак, ці переваги компенсуються зниженням захоплення енергії, оскільки ротор перехоплює вітри з меншою енергією [2]. Також незважаючи на те, що електрогенератор та трансмісія знаходяться на рівні землі, технічне обслуговування не є простим, оскільки зазвичай потребує демонтажу ротора. Більше того, ці ротори підтримуються тросами, займаючи значну площу

землі. З цих причин використання вертикально-осьових вітряних турбін значно скоротилося за останні десятиліття.

## **1.2 Система керування вітрогенератором**

Необхідність керування виникла ще на зорі створення вітрогенераторів. Основними цілями керування були обмеження потужності і швидкості до деяких заданих значень для запобігання небезпечній роботі вітрогенератора за умов сильного вітру. Колишні конструкції вітрогенераторів включали примітивні механічні пристрої досягнення цих цілей. У міру збільшення розмірів та потужності вітрогенераторів, технічні вимоги до систем керування ставали дедалі жорсткішими, а механізми регулювання – дедалі складнішими. Все частіше від систем керування очікувалося не лише підтримання турбіни в безпечній робочій області, а й підвищення ефективності та якості перетворення енергії. В результаті вони поступово розвивалися, поки сьогодні не відігравали вирішальну роль у сучасних вітрогенераторах.

Розробка системи керування вітрогенератором може бути поділена на кілька етапів. Перше завдання полягає у чіткому визначенні цілей керування. Другим завданням є вибір відповідної стратегії керування, визначення робочої точки вітрогенератора кожної швидкості вітру. Третє завдання вирішує, як буде реалізовано стратегію керування. Вона включає вибір схем керування, керованих змінних, опорних сигналів, процедури перемикання між різними контролерами і т.д. Цей етап зазвичай називають налаштуванням контролера. Нарешті, останнім завданням, попередньої реалізації, є проектування карти вхід-вихід, тобто динамічних характеристик контролера відповідно до специфікації [3-5].

### **Цілі керування:**

Вітрогенератор є пристроєм, що вловлює частину енергії вітру і перетворює її на корисну енергію. Особливо вітрогенератор, що підключається до електричних мереж, повинен бути спроектований для мінімізації вартості енергії, що поставляється, забезпечуючи безпечну експлуатацію, а також дотримання стандартів акустичної емісії та якості електроенергії.

Мінімізація вартості енергії включає низку приватних цілей. Насправді ці цілі тісно пов'язані і іноді суперечать одна одній. Тому вони не повинні переслідуватись окремо. Навпаки, питання полягає в тому, щоб знайти добре збалансований компроміс між ними. Ці часткові цілі можна розмістити на наступні теми:

- уловлювання енергії: Максимізація уловлювання енергії з урахуванням обмежень безпечної експлуатації, таких як номінальна потужність, номінальна швидкість, швидкість вітру при відключенні тощо;
- механічні навантаження: Запобігання надмірним динамічним механічним навантаженням на вітрогенератор. Ця загальна мета включає пом'якшення перехідних навантажень, пом'якшення високочастотних навантажень і запобігання резонансу;
- якість електроенергії: Забезпечення відповідності енергії, що виробляється стандартам міжмережевої взаємодії;

#### **Уловлювання енергії:**

Для вітряної турбіни генераторна потужність визначає обсяг енергії, який може бути витягнутий з вітру з урахуванням фізичних та економічних обмежень. Зазвичай вона представлена у вигляді кривої на площині потужність, що генерується - швидкість вітру, так званої кривої ідеальної потужності [6].

На рисунку 1.3 показано криву максимальної потужності для стандартної вітряної турбіни. Видно, що діапазон робочих швидкостей вітру обмежений швидкостями вітру на вході ( $V_{min}$ ) та виході ( $V_{max}$ ). За цими межами турбіна залишається зупиненою. Нижче швидкості вітру на вході доступна енергія вітру надто мала, щоб компенсувати експлуатаційні витрати та втрати. При швидкості вітру, що перевищує швидкість вимкнення, турбіна вимикається, щоб запобігти перевантаженню конструкції [7].

Будівництво турбіни, досить міцної для того, щоб витримати основні механічні навантаження за дуже сильного вітру, було б абсолютно нерентабельним. Насправді незважаючи на те, що швидкість вітру вище за  $V_{max}$  містить величезну енергію, її внесок у середньорічну енергію мізерно малий. Це підтверджує рисунок 1.4 де показана типова функція щільності потужності на

даній ділянці. Там видно, що енергія, що залишається не уловленою через зупинку турбіни за межами швидкості вітру  $V_{\min}$  і  $V_{\max}$ , порівняно мала.

На рисунку 1.3 також можна відзначити, що крива максимальної потужності залишається постійною за номінальної потужності  $P_N$  вище швидкості вітру  $V_N$ , названою номінальною швидкістю вітру  $V_N$ . Номінальна потужність турбіни виникає внаслідок компромісу між доступною енергією та виробничими витратами [9].

Наприклад, проектування турбіни для отримання всієї доступної енергії аж до швидкості вітру до відсічення призведе до збільшення вартості одного кВт. Насправді, швидкість вітру вище  $V_N$  зустрічається недостатньо часто, щоб виправдати додаткові розміри турбіни, необхідні отримання енергії вище номінальної.

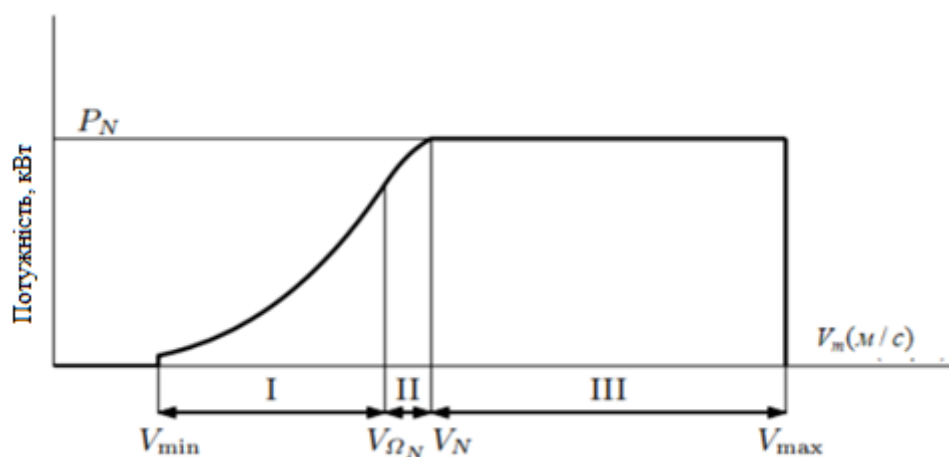


Рисунок 1.3 – Крива максимальної потужності

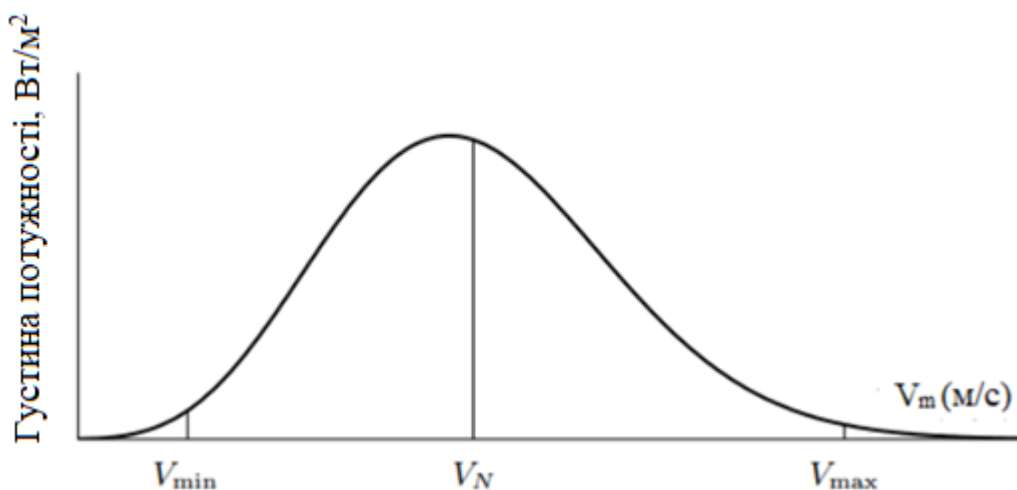


Рисунок 1.4 – Щільність потужності залежно від швидкості вітру.

Крива максимальної потужності є три різних регіони з різними цілями генерації. При низькій швидкості вітру (регіон I) доступна потужність нижче за номінальну. Доступна потужність визначається як потужність вітру, що проходить через площу ротора, помножена коефіцієнт максимальної потужності  $C_p$ , тобто.

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda_t, \beta) \quad (1.1)$$

$P_m$  - одержана механічна потужність турбіни Вт;

$V_w$  - швидкість вітру, м/с;

$C_p$  - коефіцієнт використання енергії вітру;

$R$  - радіус ротора, м;

$\rho$  - густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda_t$  - Коефіцієнт крутного моменту;

$\Omega$  - Кутова швидкість валу турбіни, рад/с;

$\beta$  - кут нахилу лопатей, град.

Таким чином, метою виробництва в регіоні I є вилучення всієї доступної потужності. Тому крива максимальної потужності у цьому регіоні відповідає кубічній параболі, яка визначається (1.1) [10].

З іншого боку, метою виробництва в регіоні з високою швидкістю вітру (регіон III) є обмеження потужності, що генерується нижче номінального значення, щоб уникнути перевантаження. У цьому регіоні доступна потужність перевищує номінальну, тому турбіна має працювати з ККД нижче за  $C_p$ . Нарешті існує область II, яка фактично є перехідною між кривою оптимальної потужності області I та лінією постійної потужності регіону III. У цій галузі швидкість обертання ротора обмежується для підтримки акустичного шуму в межах допустимих рівнів і підтримки відцентрової сили нижче значень, допустимих для ротора. Зрештою, якщо таке обмеження швидкості не досягнуто, регіон II може не існувати, а крива оптимальної потужності

(Тобто регіон I) може продовжуватися до досягнення номінальної потужності.

**Механічні навантаження:**

Мінімізація витрат на електроенергію робить систему керування не тільки розробленою для якомога точнішого відстеження кривої максимальної потужності. Насправді повинно бути ігнорування інших цілей керування. Наприклад, необхідно враховувати механічні навантаження, яким зазнають вітряні турбіни. Механічні навантаження можуть спричинити втомне пошкодження кількох пристроїв, тим самим скорочуючи термін служби системи. Оскільки загальна вартість вітрогенератора розподіляється більш короткий період, вартість енергії зростатиме.

Здебільшого існує два типи механічних навантажень, тобто статичні та динамічні. Статичні навантаження виникають у результаті взаємодії турбіни із середньою швидкістю вітру. Набагато важливішими з погляду керування є динамічні навантаження, які викликаються просторовим і тимчасовим розподілом поля швидкості вітру площею, обтічної ротором. Динамічні навантаження включають зміни чистого аеродинамічного моменту, які поширюються вниз по трансмісії, і зміни аеродинамічних навантажень, які впливають на механічну конструкцію. Це так звані навантаження на трансмісію та конструкцію, відповідно [11].

Крім того, існує ще одна поширена класифікація динамічних навантажень. Спочатку існують перехідні навантаження, які викликаються турбулентністю та поривами. Вони мають переважно низьку частоту. Перехідні навантаження мають дуже важливе значення при високих швидкостях вітру, особливо визначення номінальних характеристик компонентів. Перехід між відстеженням максимальної потужності (регіон I) і регулюванням потужності (регіон III), а також спосіб обмеження потужності при швидкості вітру вище номінальної безпосередньо впливають на перехідні навантаження. Невідповідні стратегії керування можуть неминуче призвести до перехідних навантажень. Тому при плануванні стратегії керування необхідно враховувати їх. Крім того, налаштування та конструкція контролера також впливають на перехідні навантаження. Фактично, якість електроенергії:

Якість електроенергії впливає вартість енергії декількома способами. Наприклад, низька якість електроенергії може вимагати додаткових інвестицій у лінії електропередач або накласти обмеження на потужність, що постачається в

мережу. Через довгострокову та короткострокову мінливість енергоресурсу та взаємодію з електромережею вітрогенератори традиційно вважаються постачальниками електроенергії низької якості. Тому при проектуванні системи керування необхідно враховувати кондиціонування потужності. Ця вимога до керування стає дедалі актуальнішою у міру того, як масштаб потужності вітрогенеруючих установок наближається до потужності звичайних електростанцій. Якість електроенергії в основному оцінюється за стабільністю частоти та напруги в точці підключення до мережі та за емісією флікера [12].

Загалом, частота є стабільною величиною. Коливання частоти в електричній мережі відбуваються через дисбаланс потужності. Наприклад, генератори прискорюються, коли потужність, що поставляється, перевищує споживану, отже, частота збільшується. Аналогічно, генератори уповільнюються, коли вони не можуть покрити попит на потужність, тим самим знижується частота. Зазвичай при підключенні до загальної мережі поодинокі вітряні турбіни або невеликі вітропарки не впливають на частоту. Однак це не так, коли вітряна турбіна є частиною ізольованої енергосистеми або коли ми маємо справу з великою вітряною електростанцією. У цих випадках може виникнути ситуація, коли необхідно регулювати загальну потужність, що поставляється вітрогенератором.

Взаємодія вітрогенераторів із електричною мережею впливає на напругу на терміналах мережі. Наприклад, повільні коливання напруги відбуваються, коли потужність, що споживається вітрогенератором, змінюється в залежності від середньої швидкості вітру. Амплітуда цих коливань тісно залежить від опору мережі в точці підключення та від потоків активної та реактивної потужності. Спосіб ослаблення цих коливань напруги без впливу відбір потужності полягає в управлінні потоком реактивної потужності. Це зазвичай виконується, наприклад, за допомогою конденсаторних батарей або синхронних машин, що споживають або віддають реактивну потужність. Тим не менш, оскільки сучасні вітрові турбіни підключаються до мережі через силові перетворювачі, поточна тенденція полягає у використанні гнучкості керування, що забезпечується силовою електронікою або, безпосередньо, напруги можна досягти шляхом адекватного керування електронними перетворювачами. Кожна з цих схем керування може бути реалізована незалежно від керування іншими частинами вітрогенераторів.

Тобто, керування реактивною потужністю може бути відокремлено від керування кутом тангажу, швидкістю або крутним моментом. Керування реактивною потужністю не розглядається в цій роботі, оскільки воно більше пов'язане з електронним перетворенням енергії, ніж перетворення енергії вітру.

### **1.3 Висновки до розділу**

Розглянуто загальні відомості про вітроенергетику. Проведено аналіз конструкції та класифікації вітрогенераторів. Описані різні типи вітрогенераторів з їх типовими конструкціями, зокрема, вертикальні та горизонтально-осьові вітрогенератори.



## 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Класифікація системи керування вітрогенераторів

Вітрогенератори були класифіковані на чотири основні типи [8]:

- Вітрогенератори з фіксованою швидкістю (рисунок 2.1).
- Вітрогенератори зі змінним ковзанням (рисунок 2.2).
- Вітрогенератори з подвійним живленням від асинхронного генератора (DFIG) (рисунок 2.3).
- Вітрогенератори з повним перетворенням (рисунок 2.4).

Блок – схема цих типів вітрогенераторів представлена наступних рисунках:

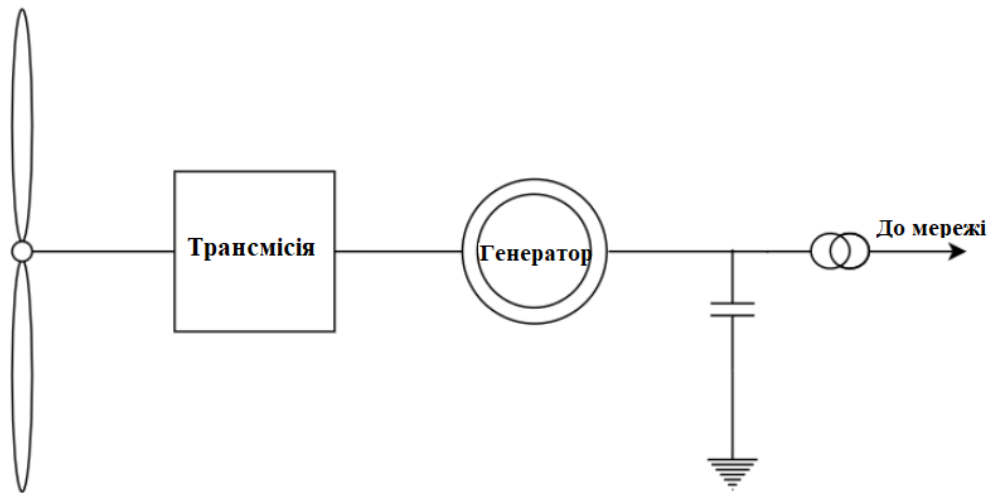


Рисунок 2.1 – Вітрогенератори з фіксованою швидкістю

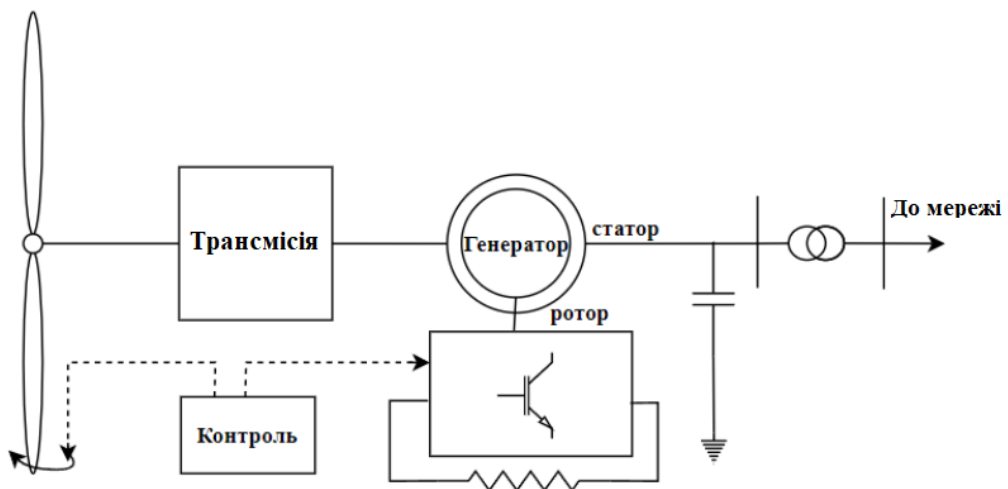


Рисунок 2.2 – Вітрогенератори зі змінним ковзанням

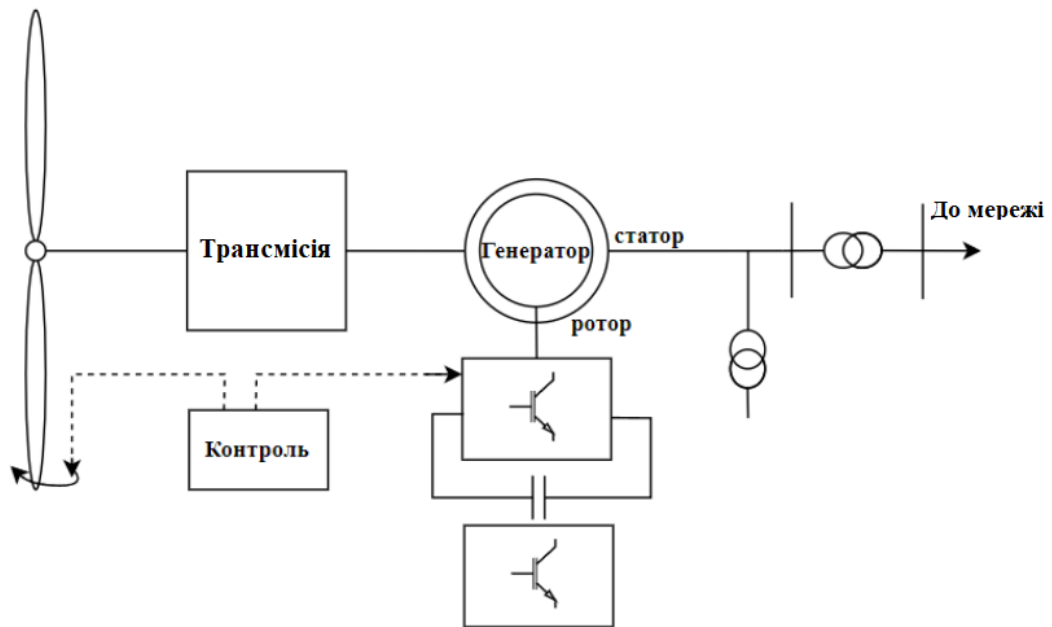


Рисунок 2.3 – Вітрогенератори з подвійним живленням від асинхронного генератора (DFIG)

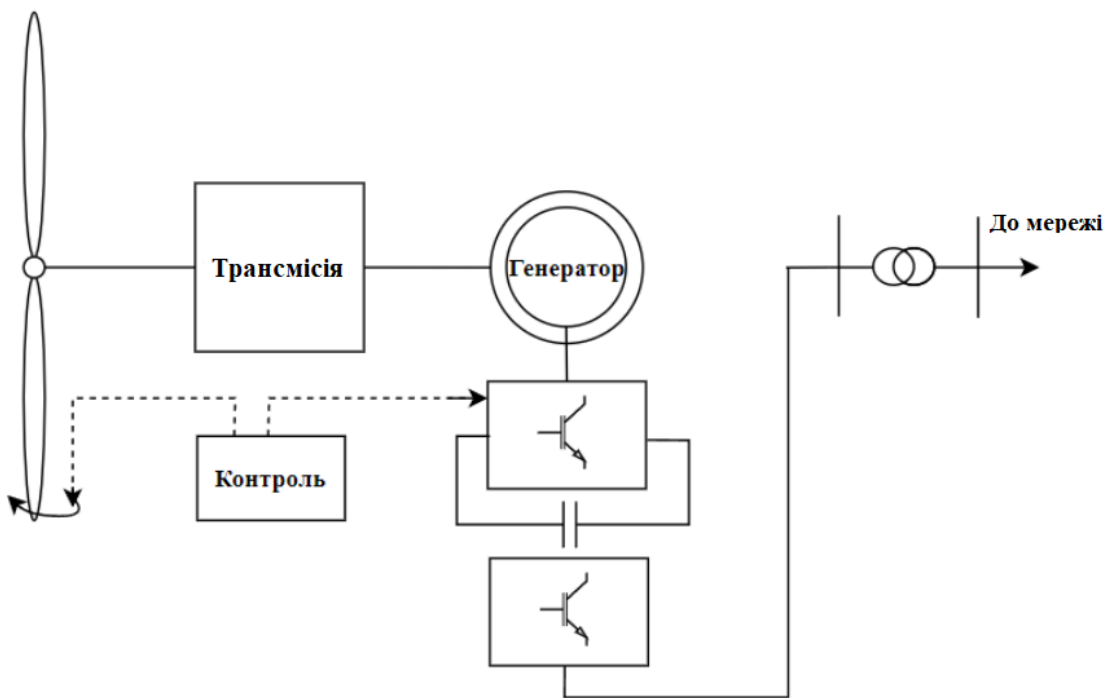


Рисунок 2.4 – Вітрогенератори з повним перетворенням

Вітрогенератори з фіксованою швидкістю обертання є найпростішими вітрогенераторами, які зараз діють. Вони працюють з малою зміною швидкості обертання ротора турбіни та використовують індукційні машини (ІМ) з короткозамкненим ротором, безпосередньо підключені до мережі. Деякі з цих турбін не мають можливості зміни кута нахилу лопатей.

Хоча ця технологія відносно міцна і надійна, вона має суттєві недоліки, що полягають у неоптимальному вловлюванні енергії вітру та необхідності компенсації реактивної потужності.

Вітрові турбіни зі змінною швидкістю розроблені для роботи в широкому діапазоні швидкостей обертання ротора. У таких вітрогенераторах зазвичай використовують регулювання кута нахилу лопатей. Керування швидкістю та потужністю дозволяє цим вітрогенераторам видобувати більше енергії з даного режиму вітру, ніж вітрогенератори з фіксованою швидкістю. Вітрогенератори зі змінним ковзанням або динамічним опором ротора керують опором у ланцюзі ротора машини, щоб забезпечити широкий діапазон зміни експлуатаційного ковзання (швидкості) (до 10%). Однак потужність губиться у вигляді тепла в опорі ротора. Вітрогенератори з подвійним живленням асинхронного генератора (DFIG) вирішують цю проблему, використовуючи перетворювач змінного в постійного і в змінний струм кола ротора для відновлення потужності ковзання. Флюкс-векторне керування струмами ротора дозволяє розділити реальну та реактивну потужність, а також максимізувати вилучення енергії вітру та знизити механічну напругу.

У вітрогенераторах з повним перетворенням з постійного струму у змінний струм "спина до спини" є єдиним шляхом потоку енергії від вітрової турбіни до мережі. Прямого підключення до мережі немає. Ці турбіни можуть використовувати синхронні або асинхронні генератори та пропонують незалежне керування реальною та реактивною потужністю.

## **2.2 Стратегії керування вітрогенератором**

Стратегія керування в певному випадку характеризується тим, як турбіна проектується для наближення в стані стабілізації до кривої максимальної потужності в діапазоні потужність - швидкість вітру.

Таким чином, стратегія керування встановлює значення крутного моменту (або потужності) і швидкості обертання ротора для кожної швидкості вітру в діапазоні роботи турбіни. Стратегія керування впливає на налаштування та конструкцію контролера. Насправді, схеми керування можуть відрізнятися

залежно від регіону експлуатації. Більше того, моделі малих сигналів, які використовуються для проектування регулятора, сильно залежать від режимів та регіонів роботи.

Можливо, найбільш підходящим простором зображення стратегії керування є простір "крутний момент - швидкість обертання - швидкість вітру". Але для допомоги в поясненні криві часто проектуються на площину моменту, що крутить, - швидкості обертання. Стратегію керування представлено робочим місцем турбіни, параметризованим швидкістю вітру. У цій роботі представлені та розглянуті різні стратегії керування.

### **2.2.1 Фіксована швидкість та фіксований кут атаки**

Схема роботи з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки була домінуючою протягом кількох десятиліть. Проте останнім часом кількість комерційних вітрових турбін, що ґрунтуються на цій схемі, зменшується.

В цій схемі асинхронна електрична машина безпосередньо підключена до електромережі. Тому її характеристика моменту, що крутить, не може бути змінена. Отже, швидкість генератора фіксується в залежності від частоти електромережі. Таким чином, кажуть, що вітрогенератор працює із фіксованою швидкістю. Насправді швидкість змінюється кілька відсотків уздовж характеристики крутного моменту генератора через ковзання.

Через відсутність додаткових апаратних засобів для реалізації стратегії керування, вітрогенератор з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки дуже прості та недорогі. Як наслідок, їх експлуатаційні показники досить низькі. На практиці, для зниження механічних навантажень та поліпшення якості електроенергії не може бути вжито жодних активних дій з керування. Крім того, ефективність перетворення ще не стала оптимальною.

На рисунок 2.5 показано основну стратегію керування вітрогенераторами з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки у площині крутний момент - швидкість обертання.

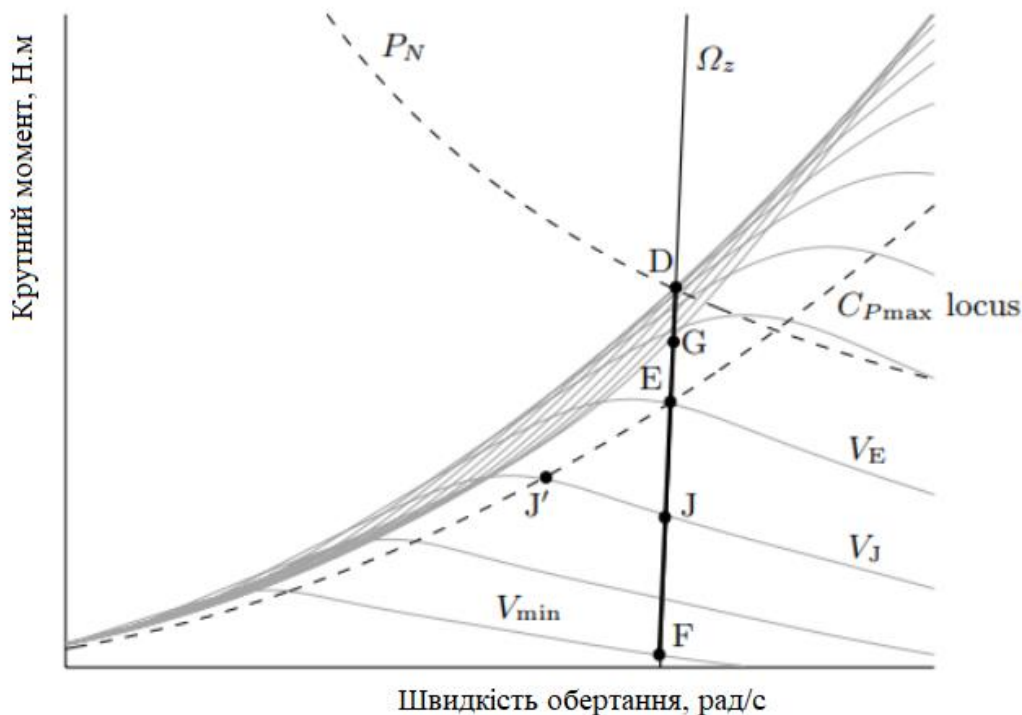


Рисунок 2.5 – Основна стратегія керування вітрогенератора з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки

Суцільна лінія зображує характеристику реактивного моменту, а сірі лінії зображують характеристики аеродинамічного моменту різних швидкостей вітру від  $V_{min}$  до  $V_{max}$ . Варто нагадати, що точки перетину є точками режиму роботи вітрогенератора, що встановився, при відповідних швидкостях вітру.

Через те, що момент реакції та аеродинамічний момент не можуть бути змінені, тому всі можливі робочі точки обмежені відрізком  $FD$ . Швидкість обертання майже постійна вздовж  $FD$ , тому потужність більш менш пропорційна крутному моменту протягом усього цього робочого відрізка. Робоча точка  $F$  відповідає швидкості вітру  $V_{min}$ , а  $D$  є точкою, де характеристика моменту опору перетинає фронт зриву, тобто. верхню межу всіх параметрів аеродинамічного моменту.

Ця точка визначає максимальну потужність, яку може одержати турбіна. При швидкості вітру  $VD$ , Для якої характеристика аеродинамічного моменту проходить через точку  $D$ , турбіна зупиняється. Тому вища швидкість вітру призводить до зниження аеродинамічної потужності. Тому робоча точка переміщається назад за характеристикою моменту, що крутить, генератора до

досягнення точки G, пов'язаної зі швидкістю вітру відсічки  $V_{\max}$ . Слід зазначити, що є суперпозиція робочих точок на відрізку GD. Це означає, що швидкість вітру не може бути однозначно визначена робочою точкою.

На рисунку 2.5 зображена парабола, що показує точку максимальної ефективності перетворення, також звана точкою максимальної потужності або  $C_{p\max}$ . Вона показує, що турбіна працює з максимальною ефективністю за певної швидкості вітру  $V_E$ . Ця ситуація відповідає точці E, де точка максимуму потужності, момент реакції та аеродинамічний момент для  $V=V_E$  перетинаються.

У цій точці швидкість вітру та швидкість обертання задовольняють  $\lambda_0 = \frac{R\Omega_E}{V_E}$ .

Допустимо тепер, що вітрогенератор працює при E, коли швидкість вітру падає з  $V_E$  до  $V_J$ . Тоді новою робочою точкою буде J. У цей момент співвідношення

швидкості обертання наконечника  $\lambda_J = \frac{R\Omega_E}{V_J}$  більше, чим  $\lambda_0$ , тому ефективність

перетворення зменшується. Щоб отримати всю потужність, доступну при  $V_J$ ,

турбіна повинна працювати в точці J' де швидкість обертання  $\Omega_{J'} \cong \frac{\lambda_0 V_E}{R}$  менше.

Це нездійсненно при стратегії керування з фіксованою швидкістю.

Вітрогенератор з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки управляються при високих швидкостях вітру. Тобто, обмеження потужності нижче за номінальну потужність відбувається в режимі пасивного зупинки. Тому вибір стратегії керування зводиться до вибору передатного відношення редуктора для проходження характеристики генератора через точку D. Зверніть увагу, що ця точка є точкою перетину гіперболи номінальної потужності (яка є межею регіону безпечної експлуатації) та передньої фронтальної лінії зриву. Таким чином, номінальна потужність перевищена за відсутності швидкості вітру.

На рисунку 2.6 показаний метод пасивного зриву обмеження потужності.

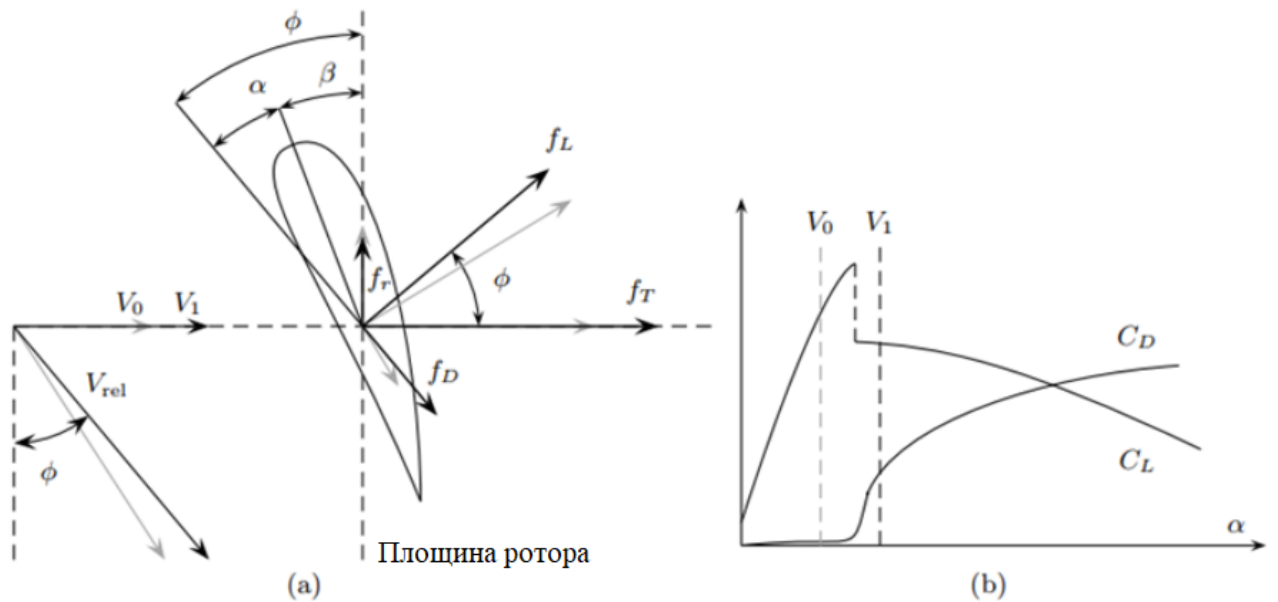


Рисунок 2.6 – Стратегія пасивного зриву для обмеження потужності: (а) сили, що діють на елемент лопасті; (б) коефіцієнти опору та підйомної сили

На рисунку якісно показані сили, що діють елемент лопаті до (сірий колір) і після (чорний колір) зриву. Нагадаємо, що швидкість обертання та кут атаки фіксовані. Тоді кут нахилу збільшується при збільшенні швидкості вітру, що випробовується елементом лопасті, від  $V_0$  до  $V_1$ . Коли перевищує задане значення, повітряний потік перестає бути ламінарним і відокремлюється від верхньої сторони аеродинамічної спіралі. Це спричиняє перепад тиску, який зменшує підйомну силу та різко збільшує опір. Зміна підйомної сили  $f_L$  та сили опору  $f_D$  призводить до значного збільшення осьової сили тяги  $f_T$ , в той час як тангенційна сила  $f_t$  зменшується незначно. В результаті аеродинамічний момент та потужність зменшуються. Вважається, що турбіна зривається. Небажаним наслідком регулювання зриву є збільшення тяги, що призводить до збільшення аеродинамічного навантаження.

На рисунку 2.7 показані характеристики фіксування потужності базової стратегії керування з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки, показаної на рисунку 2.5.

В верхній частині рисунка порівнюються криві фактичної та максимальної потужності, а в нижній частині показано ефективність перетворення залежно від швидкості вітру. На рисунку зазначені точки, відповідні точкам рисунку 2.5.

Видно, що отримана потужність відповідає кривій максимальної потужності. Це означає нижчий рівень одержання енергії. У регіоні низької швидкості вітру турбіна працює з максимальною ефективністю лише у одній точці (точка E). При швидкості вітру вище за номінальну регулювання потужності не дуже хороше. Видно, що номінальна потужність досягається тільки за однієї швидкості вітру (точка D), а за меншої та більшої швидкості вітру потужність зменшується. Таке погане регулювання пояснюється недостатньою гнучкістю режиму роботи.

Крім низької ефективності перетворення, робота з фіксованою швидкістю характеризується іншими недоліками, пов'язаними з динамічною поведінкою вітрогенератор. Наприклад, погана властивість регулювання призводить до коливань активної та реактивної потужності на лініях електропередачі. Крім того, цей режим роботи не забезпечує керуючих впливів для введення демпфування в трансмісію, що послабило високочастотні навантаження і викиди флікера. На практиці зниження популярності вітрогенераторів з фіксованою швидкістю і фіксованим кутом атаки в основному пов'язане з поганою якістю електроенергії, а не зі зниженням уловлювання енергії.

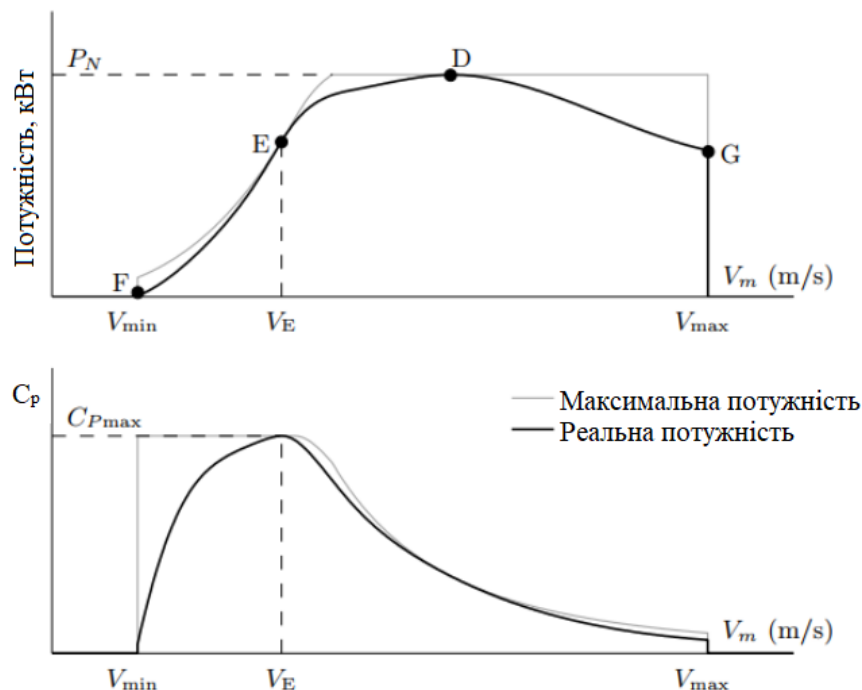


Рисунок 2.7 – Базова стратегія керування з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки: (а) вихідна потужність та (б) ефективність перетворення в залежності від швидкості вітру



### 2.2.2 Змінна швидкість та змінний кут атаки

Стратегії керування зі змінною швидкістю та змінним кутом атаки все ширше застосовуються в комерційних вітрогенераторах. У цій схемі вітрогенератор програмується на роботу зі змінною швидкістю і фіксованим кутом атаки нижче номінальної швидкості вітру і зі змінним кутом атаки вище номінальної швидкості вітру. На рисунку 2.8 показана базова стратегія керування зі змінною швидкістю обертання "pitch-to-feather" на площині «крутний момент - швидкість обертання». При низькій швидкості вітру турбіна працює вздовж локусу  $C_{pmax}$  між точками А і В. У точці В швидкість обертання досягає своєї верхньої межі  $\Omega_N$ . Тому швидкість обертання регулюється при цьому значенні на відрізку ВС у міру збільшення швидкості вітру від  $V_{\Omega N}$  до  $V_N$ . При швидкості вітру вище, номінальний кут поздовжнього нахилу регулюється для підтримки роботи турбіни в точці С. Зверніть увагу, що відрізок ВС спускається в точку С, коли перетин гіперболи номінальної потужності та параболи максимального ККД лежить ліворуч від межі швидкості обертання. У цьому випадку робочий локус зводиться до кривої АС.

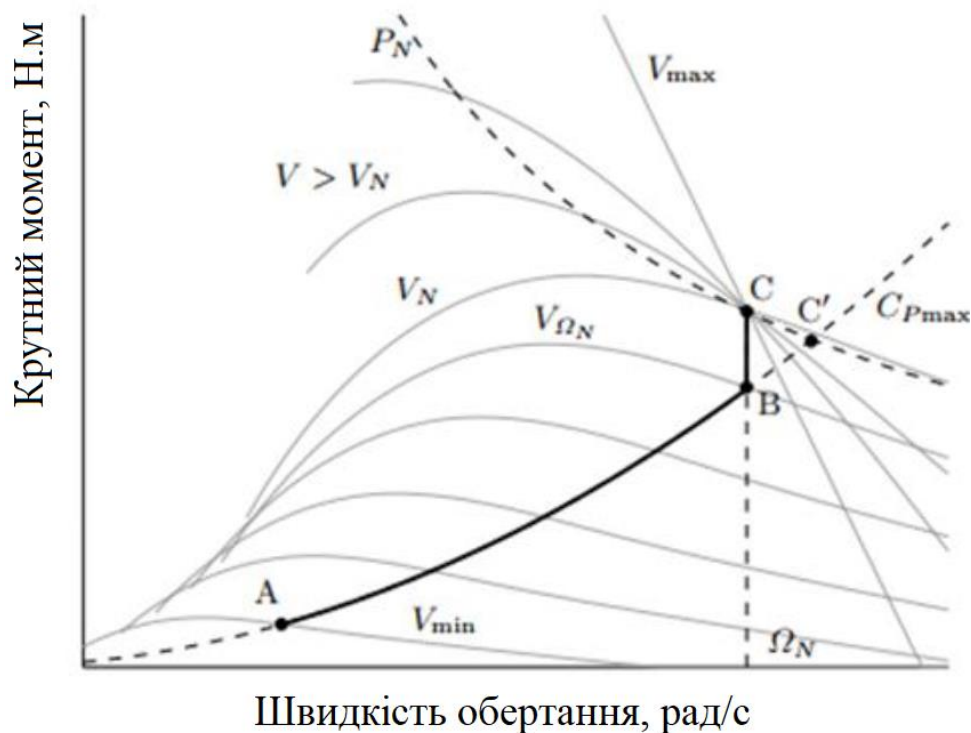


Рисунок 2.8 – Базова стратегія керування зі змінною швидкістю та змінним кутом атаки (pitch-to-feather)

Робота зі змінною швидкістю збільшує можливість отримання енергії при низькій швидкості вітру, тоді як робота зі змінним кутом атаки дозволяє ефективно регулювати потужність при швидкості вітру, що перевищує номінальну. Крім того, робота зі змінним кроком полегшує перехідні навантаження. Це важлива перевага даної стратегії керування порівняно зі змінною швидкістю та фіксованим кутом атаки, особливо для великомасштабних вітрових турбін. Більш того, одночасне керування кутом атаки та швидкістю вище номінальної швидкості вітру забезпечує важливі переваги для динамічних характеристик вітрогенератора в умовах сильного вітру.

### 2.3 Моделювання системи вітрогенератора

В цьому розділі представлено моделювання системи вітрогенератора. Для цього підсистеми моделюються, а потім об'єднуються моделі у велику модель системи. На наступному рисунку 2.9 представлена блок - схема моделювання системи вітрогенератора.

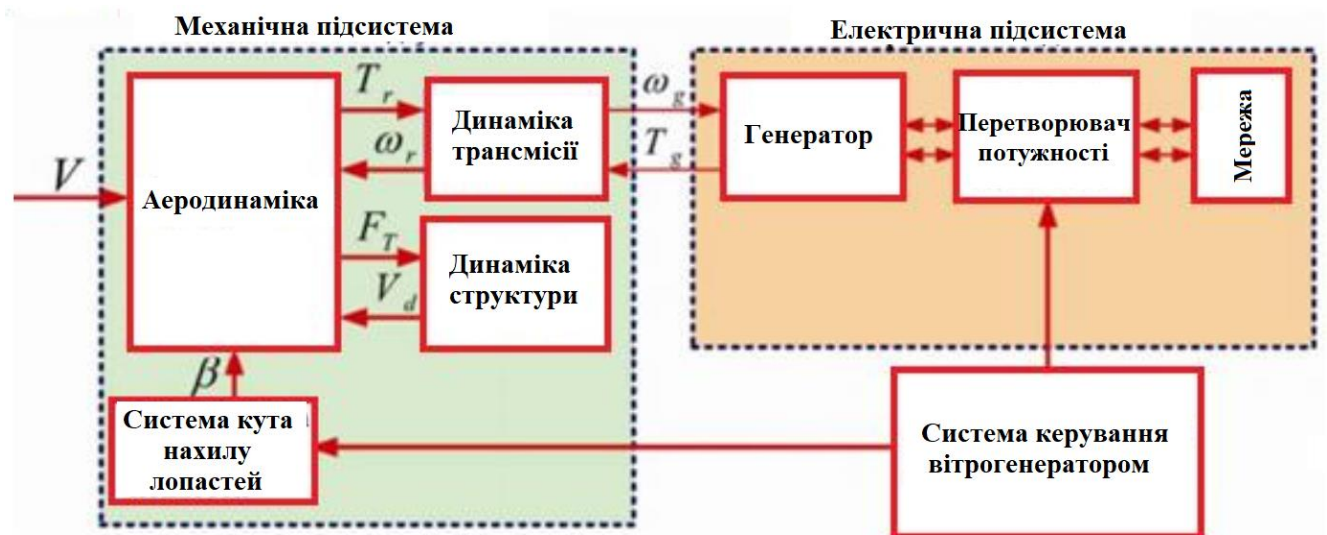


Рисунок 2.9 – Блок - схема моделювання системи вітрогенератора

У якій  $V$  – швидкість вітру, м/с;  $T_r$  - Механічний момент ротора, Н.м;  
 $\omega_r$  - Кутова швидкість ротора, рад/с;  $F_T$  - Сила тяги, Н;  $V_d$  – швидкості осевого обертання ротора, м/с;  $\omega_g$  - Кутова швидкість валу генератора, рад/с;  
 $T_g$  - механічний момент генератора, Вт;  $\beta$  – кут нахилу лопатей, град

### 2.3.1 Моделювання аеродинамічної вітротурбіни

Кінетична енергія  $E$  (Дж) повітряної маси  $m$  (кг), що рухається зі швидкістю  $V$  (м/с), визначається за наступним рівнянням:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.1)$$

де  $m = \rho v S \Delta t$ ;  $S$  - Площа, захоплювана лопатями ротора,  $m^2$

Рекуперації потужності визначаються за такою формулою:

$$P_m = 0.5 \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda_t, \beta) \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) у системі відносних одиниць:

$$P_{m\_pu} = k_p C_{p\_pu} V_{wind\_pu}^3 \quad (2.3)$$

Загальне рівняння коефіцієнта потужності  $C_p(\lambda_t, \beta)$  цього рівняння залежить від параметрів конкретної турбіни

$$C_p(\lambda_t, \beta) = c_1(c_2 / \lambda_t - c_3 \beta - c_4) e^{-c_5 / \lambda_t} + c_6 \lambda_t \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

На наступному рисунку представлено коефіцієнт  $C_p$ , який залежить від  $\lambda_t$  для кожного  $\beta$ , коефіцієнти з  $c_1$  від  $c_6$ :  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ;  $c_6 = 0.0068$ .

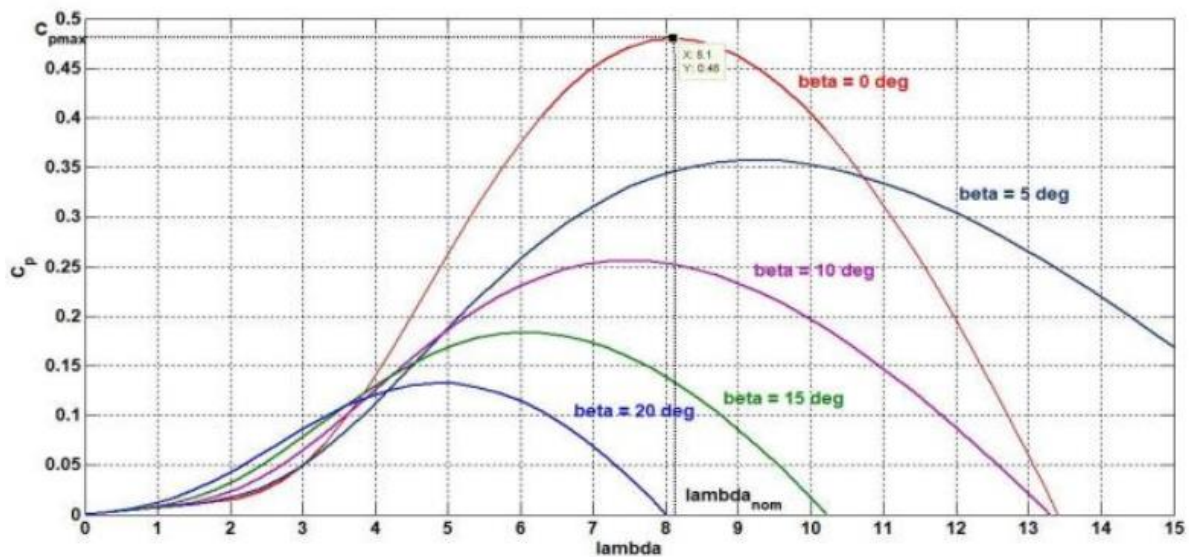


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт потужності  $C_p$  залежить від  $\beta$

Максимальне значення  $C_p$  дорівнює 0.48 при  $\beta = 0$ ,  $\lambda_t = 8.1$ , це значення  $\lambda_t$  називаються номінальна вартість (nominal value)  $\lambda_{t.nom}$

### 2.3.2 Відстеження точки максимальної потужності

Алгоритм відстеження точки максимальної потужності необхідний вітрогенератора, щоб отримати максимальну можливу потужність від вітру, яка динамічно залежить від швидкості вітру. Залежно від швидкості вітру існує певна швидкість генератора, який має максимальну потужність. При перевищенні певної швидкості генератора, отримана потужність буде різко знижена. Таким чином, МРРТ контролер використовується для відстеження питомої швидкості та отримання максимальної потужності з вітру в змінній швидкості вітряної турбіни.

Потужність турбіни виходить від швидкості вітру за співвідношенням:

$$P_m = 0.5 \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda_t, \beta)$$

На рисунку 2.11 показана залежність між механічною потужністю та швидкістю обертання турбіни для різних швидкостей вітру:

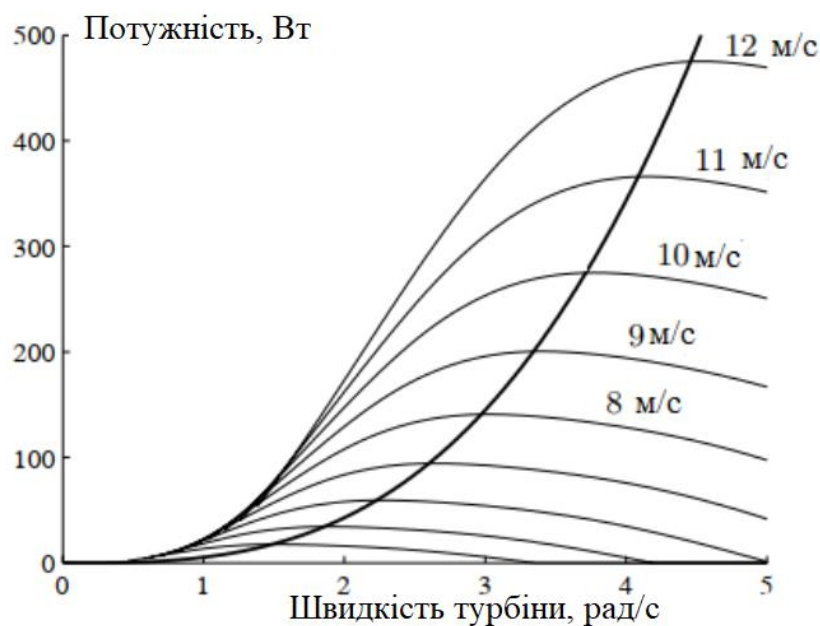


Рисунок 2.11 – Залежність потужності від швидкості турбіни

### 2.3.3 Моделювання механічної підсистеми

Горизонтально-осьова вітрова турбіна є складною механічною системою, що складається з взаємодіючих пристроїв з певним ступенем гнучкості. Як і будь-яка гнучка конструкція, вітрова турбіна має багато режимів коливань. Тому

необхідно ретельне проектування вітрової турбіни та контролера. В механічній моделі акцент робиться тільки на ті частини динамічної структури вітрової турбіни, які роблять внесок у взаємодію з мережею. Тому в першу чергу розглядається тільки приводна передача, так як ця частина вітрової турбіни має найбільший вплив на коливання потужності. На рисунку 2.12 показано механічну модель приводної передачі

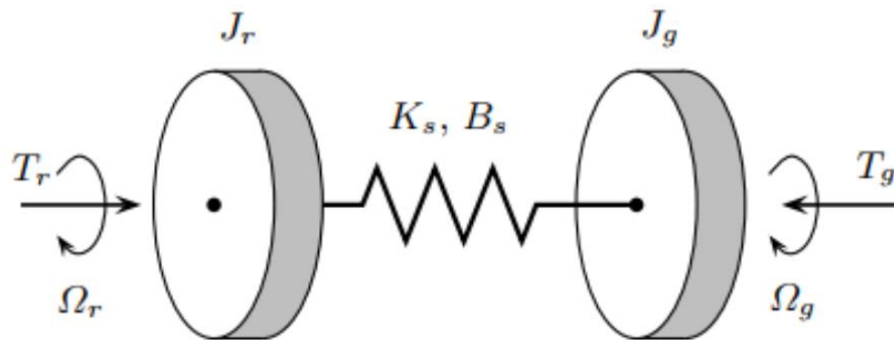


Рисунок 2.12 – Механічна модель приводної передачі

У здебільшого, це модель двох мас, з'єднаних гнучким низькошвидкісним валом, що характеризується жорсткістю  $K_s$  і демпфуванням  $B_s$ . Дві маси відповідають великій інерції  $J_r$  ротора турбіни, що представляє лопаті і ступецю, малої інерції  $J_g$ , представляє індукційний генератор.

#### 2.4 Математична модель синхронного генератора з постійними магнітами

В синхронному генераторі з постійними магнітами завжди існує фіксований магнітний потік завдяки системі постійних магнітів, які рівномірно встановлені на поверхні ротора, тому потік ротора завжди має чітку поляризацію та орієнтацію. Тому була досліджена модель генератора в системі координат обертання  $dq$  із напрямком справжньої осі  $d$  збігаються з віссю потоку. Система координат обертається навколо початку координат з кутовою швидкістю  $\omega$ , яка є механічною швидкістю ротора і також збігається з кутовою швидкістю  $\omega_s$ .

В трифазних машинах змінного струму у всіх нас є три синусоїдальні струми з однаковою амплітудою, частотою та різницею фаз, поточні статор через три полюси, відповідні фазам u, v, w.

Ці три струми  $i_{su}$ ,  $i_{sv}$ ,  $i_{sw}$  задовольняють рівняння

$$i_{su}(t) + i_{sv}(t) + i_{sw}(t) = 0 \quad (2.6)$$

На механічній площині (поперечному перерізі) машини встановлюємо комплексну систему координат з дійсною віссю, що проходить через обмотку u-фази. У цій системі координат визначено просторовий вектор струму статора наступним чином:

$$i_s = \frac{2}{3} [i_{su}(t) + i_{sv}(t)e^{j120^\circ} + i_{sw}(t)e^{j240^\circ}] = |i_s| e^{j\omega_s t} \quad (2.7)$$

Струм кожної фази є проекцією відповідного вектора статора струму на вісь відповідної фазної обмотки. Для інших величин статора машини, таких як статора напруга, потік статора, можемо побудувати відповідні просторові вектори, як для струмів статора, згаданих вище. Загалом будь-яка статорна величина  $x$  визначає просторовий вектор наступним чином:

$$x_s = \frac{2}{3} [x_{su} + x_{sv}(t)e^{j120^\circ} + x_{sw}e^{j240^\circ}] = |x_s| e^{j\omega_s t} \quad (2.8)$$

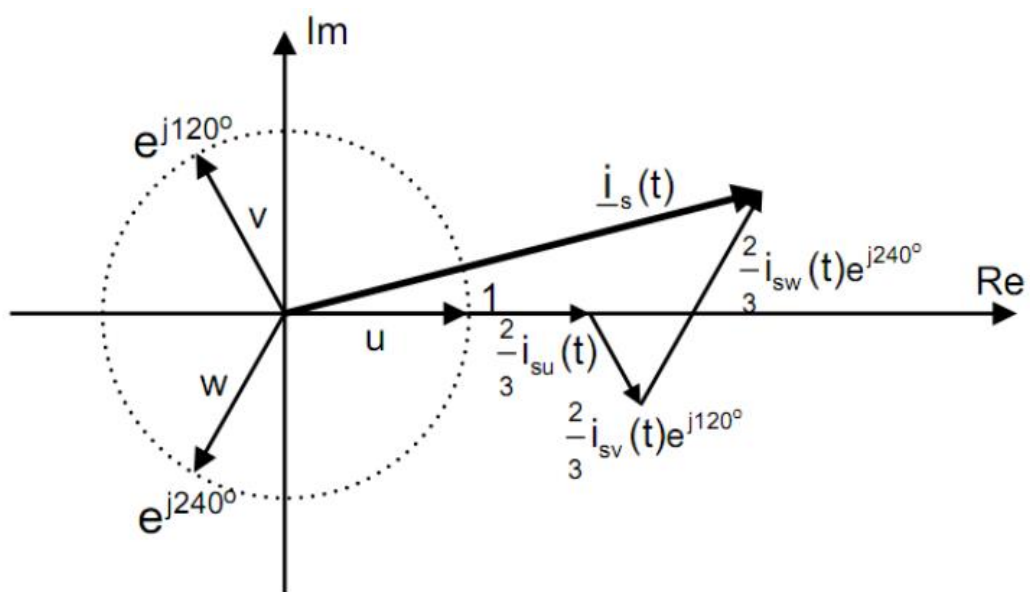


Рисунок 2.13 –Просторовий вектор струму статора

Назвемо вказану вище комплексну систему координат, системою координат  $\alpha\beta$  з віссю,  $\alpha$ , яка збігається з віссю обмотки фази u. Це фіксована система координат статора. Компоненти вектора статора струму на двох осях координат  $i_{s\alpha}$  та  $i_{s\beta}$ .  $i_{s\alpha}$  та  $i_{s\beta}$  визначаються із трьох фазних струмів за формулою (2.9). Навпаки, фазні струми статора машини визначаються зі складових струму  $i$  за формулою (2.10):

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_{su} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{su} + 2i_{sv}) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} i_{su} = i_{s\alpha} \\ i_{sv} = 0,5(-i_{s\alpha} + \sqrt{3}i_{s\beta}) \\ i_{sw} = -0,5(i_{s\alpha} + \sqrt{3}i_{s\beta}) \end{cases} \quad (2.10)$$

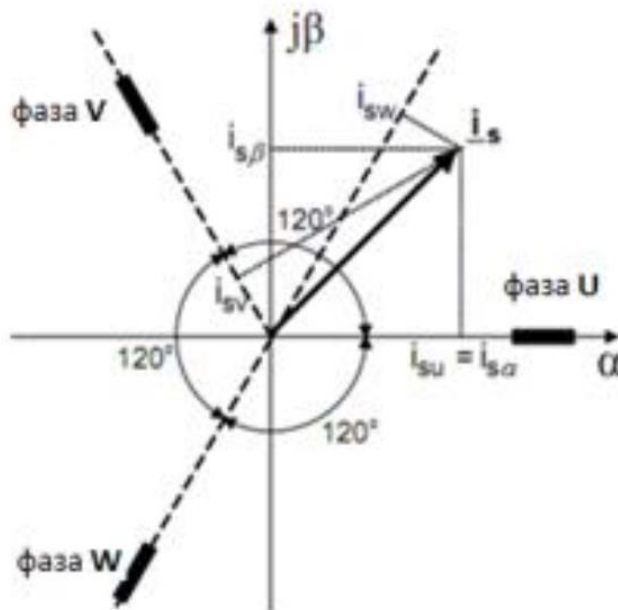


Рисунок 2.14 –Струм статора у вигляді просторового вектора у системі координат  $\alpha\beta$

Для синхронної машини з постійними магнітами збудуємо систему координат dq, в якій напрямок дійсної осі d збігається з віссю полярного потоку, а початок координат збігається з початком системи. Ця система координат

обертається навколо початку координат з кутовою швидкістю  $\omega$ , яка є механічною швидкістю ротора, яка також є швидкістю  $\omega_s$

$$\begin{cases} i_s^s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \\ i_s^f = i_{sd} + j i_{sq} \end{cases} \quad (2.11)$$

Де  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ - це дві компоненти вектора струму статора  $i_s(t)$

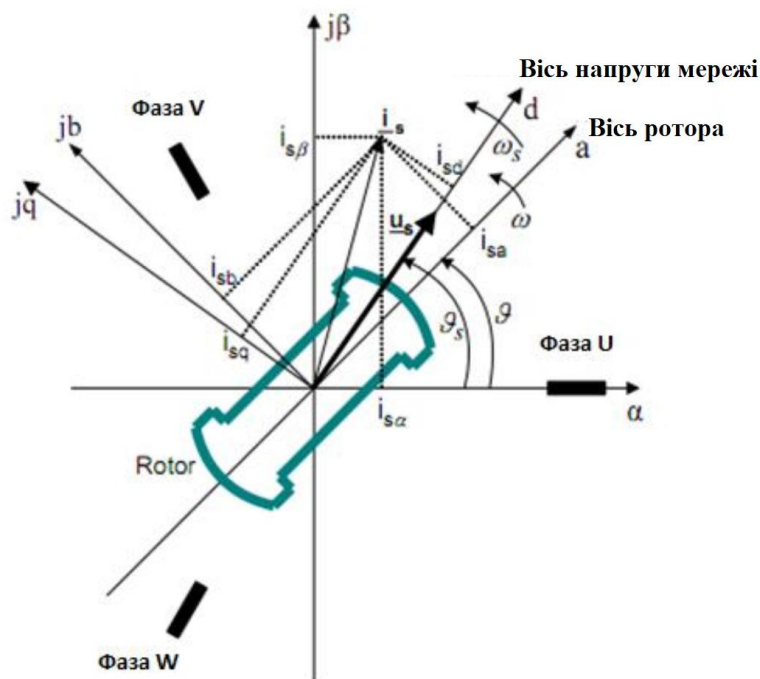


Рисунок 2.15 – Вектор струму статора на системі координат  $\alpha\beta$  та  $dq$

#### 2.4.1 Моделювання підсистеми керування кутом атаки

Керування кутом атаки зазвичай переважно у середніх та великих вітрогенераторах. Перші контролери вітрогенераторів поклалися на поступову зміну кута атаки. Привід складався з противаг, що забезпечують обертання лопатей навколо їхніх поздовжніх осей. У міру збільшення розмірів турбіни ці рудиментарні механізми замінили гідравлічними або електромеханічними пристроями. Більш висока гнучкість цих пристроїв дозволила реалізувати ефективні та надійні стратегії керування обмеження потужності чи швидкості.

Привід кута атаки є нелінійним сервоприводом, який зазвичай обертає всі лопаті - або їх частина - в один момент. У закритій циклі привід кута атаки може



бути змодельований як динамічна система першого порядку з насиченням амплітуди та похідної вихідного сигналу. На рисунку 2.16 показано блок-схему моделі приводу першого порядку. Динамічний рух приводу кута атаки, що працює в лінійній ділянці, описується диференціальним рівнянням 2.12.

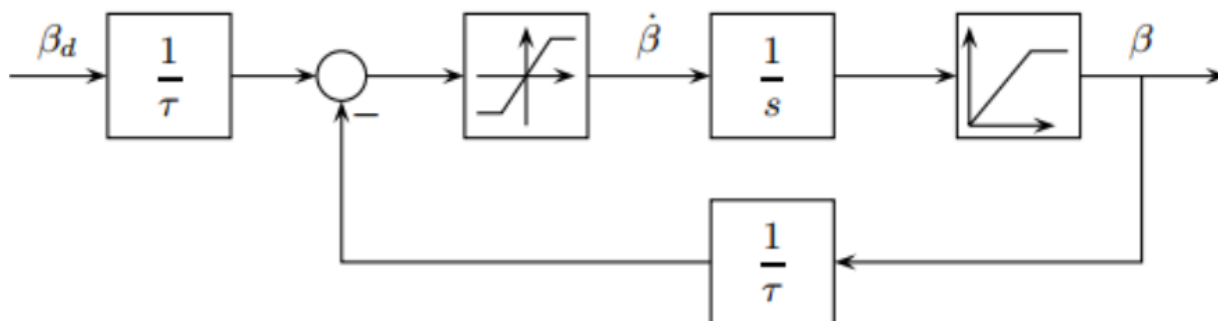


Рисунок 2.16 – Модель приводу кута атаки

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_d \quad (2.12)$$

де  $\beta$  і  $\beta_d$  - Фактичний і бажаний кут атаки, відповідно.

Регулювання потужності може вимагати швидкої та великої корекції кута атаки. Таким чином, обмеження на швидкість зміни та амплітуду кута атаки мають великий вплив на характеристики регулювання потужності. Для зниження ризику втомних ушкоджень ці межі не повинні досягатися під час нормальної роботи турбіни.

## 2.5 Висновки до розділу

Проаналізовано методи керування вітрогенератором. Таким чином, можна стверджувати, що регулювання кута атаки є важливим рішенням ефективності роботи вітрогенератора.

Вітрогенератор з фіксованою швидкістю та фіксованим кутом атаки (FS-FP) є конфігурацією, де покращити ефективність за допомогою активного керування неможливо. Ці турбіни регулюються за допомогою пасивних методів при високих швидкостях вітру. Вибір передавального числа редуктора стає важливим для

такого пасивного регулювання, оскільки він гарантує, що номінальна потужність не буде перевищена.

Вітрогенератор зі змінною швидкістю та змінним кутом атаки (VS-VP) при роботі нижче від номінальної швидкості вітру змінна швидкість і фіксований кут атаки використовуються для максимального отримання енергії та підвищення якості електроенергії. При роботі вище за номінальну швидкість вітру фіксована швидкість і змінний кут атаки дозволяють ефективно регулювати потужність. Проаналізована крива потужність від швидкості вітру, показала, що:

- в районах з низькою швидкістю вітру, коли швидкість вітру збільшується, генеруюча потужність збільшується і завжди нижче робочої потужності;
- коли швидкість вітру досягає робочої швидкості вітру, якщо швидкість вітру збільшується, потужність, що генерує, не змінюється;
- коли швидкість вітру перевищує робочий діапазон швидкостей вітру, потужність дорівнює 0.

Проведено моделювання системи вітрогенератора, в якому складається з основних підсистем, як механічної підсистеми, аеродинамічної вітротурбіни, електрогенератора та підсистеми керування кутом атаки.

### 3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Регулятор для керування струмом генератора

##### 3.1.1 ПІД регулювання для керування струмом генератора

Однією з різновидом регуляторів є пропорційно-інтегрально-диференціюючий (ПІД) регулятор, який формує сигнал, що управляє, є сумою трьох доданків: пропорційного, інтегрального і диференціального. На рисунку 3.1 представлена блок-схема регулятора ПІД.

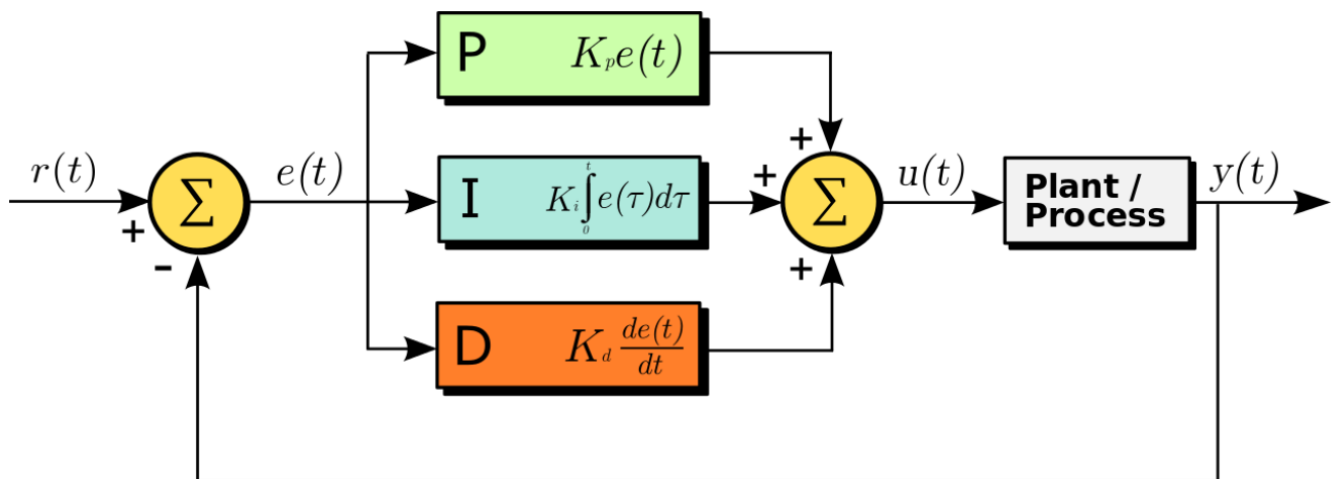


Рисунок 3.1 – Блок-схема ПІД регулятора

де  $e(t)$  помилка незгодженості, а також;

$P = K_p \cdot e(t)$  - Пропорційна;

$I = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$  - Інтегральна;

$D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$  – диференціальна складові закону керування, який у

підсумковому вигляді описується такими формулами:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.1)$$

$$u(t) = P + I + D = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Пропорційна складова  $P$ . Недоліком пропорційного закону керування є те, що регулятор ніколи не стабілізується в заданому значенні, а збільшення коефіцієнта пропорційності завжди призводить до автоколивань. Саме тому на додаток до пропорційного закону керування доводиться використовувати інтегральний і диференціальний.

Інтегральна складова  $I$  накопичує (інтегрує) помилку регулювання, що дозволяє ПД-регулятору усувати статичну помилку (помилка, що встановилася, залишкове неузгодження). Або іншими словами: інтегральна ланка завжди вносить деяке зміщення і якщо система схильна до деяких постійних помилок, то їх компенсує (за рахунок свого зміщення). А от якщо цих помилок немає або вони зневажливо малі, то ефект буде зворотним — інтегральна складова сама вноситиме помилку зміщення. Саме тому її не використовують, наприклад, у завданнях надточного позиціонування. Ключовим недоліком інтегрального закону керування ефект насичення інтегратора.

Диференційна складова  $D$  пропорційна темпу зміни відхилення регульованої величини та призначена для протидії відхиленням від цільового значення, які прогнозуються у майбутньому. Примітно те, що диференціальна компонента усуває загасаючі коливання. Диференціальне регулювання особливо ефективно для процесів, які мають великі запізнення. Недоліком диференціального закону керування є його нестійкість до впливу шумів.

Якість системи залежить від параметрів  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Для отримання бажаної якості системи необхідно аналізувати об'єкт і на цій основі вибирати відповідні параметри. В даний час існує досить багато методів для визначення параметрів ПД-регулятора, таких як:

- метод Циглера-Ніколса.
- метод Чієна-Хронеса-Ресвіка.
- метод  $T$ -суми Куна.
- метод оптимізації величини та метод оптимізації симетрії.
- метод оптимізації помилки стеження.

У жодному разі не обов'язково визначати всі три параметри. Наприклад, коли сам об'єкт має інтегральну складову, то у контролері нам не потрібно додавати інтегральну складову, тобто просто використовувати  $PD$ -контролер. І

коли сигнал у системі змінюється повільно, а сам регулятор не повинен дуже швидко реагувати на зміни статичного усунення, ми можемо використовувати ПІ-регулятор.

Таким чином, залежно від ситуації можуть застосовуватися П-, ПД-, ПІ- та ПІД-регулятори, але основним законом керування в основному є пропорційний (хоча в деяких специфічних завданнях і можуть використовуватися виключно ланки диференціаторів та інтеграторів).

### 3.1.2 ПІ регулювання для керування струмом генератора

Напруги по осі dq для синхронного генератора з постійними магнітами можуть бути записані в часовій області як:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_{sq} i_{sq} \quad (3.3)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega(L_{sd} i_{sd} + \lambda) \quad (3.4)$$

Використовуючи перетворення Лапласа цих рівнянь, ми отримуємо еквівалент у частотній ділянці у вигляді:

$$V_{sd}(s) = (R_s + sL_{sd})i_{sd}(s) - \omega L_{sq} i_{sq}(s) \quad (3.5)$$

$$V_{sq}(s) = (R_s + sL_{sq})i_{sq}(s) + \omega(L_{sd} i_{sd}(s) + \lambda) \quad (3.6)$$

Таким чином, машина може бути представлена наступною функцією передачі:

$$G_d(s) = \frac{1}{R_s + L_{sd}s} \quad (3.7)$$

$$G_q(s) = \frac{1}{R_s + L_{sq}s} \quad (3.8)$$

ПІ-регулятор використовується для встановлення струму по осі d на нуль. У системі існує час затримки датчика та час затримки обчислень. Тому запроваджуємося тимчасова затримка першого порядку. На рисунках 3.2 і 3.3 представлена блок-схема керування струмом по осях d, q:

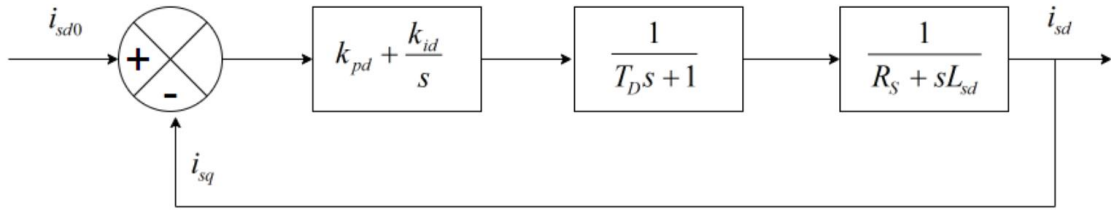


Рисунок 3.2 – Блок-схема керування струмом  $i_{sd}$

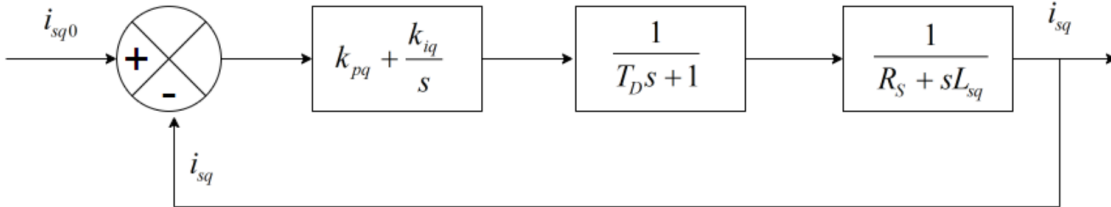


Рисунок 3.3 – Блок-схема керування струмом  $i_{sq}$

Розрахуємо параметри ПІ регулювання струмом  $i_{sd}$ , передавальна функція відкритого циклу задається так:

$$G_0(s) = \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s}\right) \cdot \frac{1}{1 + sT_D} \cdot \frac{1}{R_S + sL_{sd}} \quad (3.9)$$

Допустимо  $K_{ip} = \frac{k_{id}}{k_{pd}} = \frac{R_s}{L_{sd}}$ , тоді

$$G_0(s) = \left(k_{pd} + \frac{k_{ip}K_{ip}}{s}\right) \cdot \frac{1}{1 + sT_D} \cdot \frac{1}{R_S + sL_{sd}} = \frac{k_p}{T_D L_{sd}} \cdot \frac{1}{s\left(s + \frac{1}{T_D}\right)} \quad (3.10)$$

Якщо  $K = \frac{k_p}{T_D L_{sd}}$  тоді

$$G_0(s) = \frac{K}{s\left(s + \frac{1}{T_D}\right)} \quad (3.11)$$

Передатна функція закритого циклу  $G_{sd}(s)$ , задається наступним рівнянням:

$$G_{sd}(s) = \frac{G_{od}(s)}{1 + G_{od}(s)} = \frac{K}{s^2 + \frac{1}{T_D}s + K} \quad (3.12)$$

Загальні рівняння системи другого порядку має вид:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.13)$$

За методикою порівняння коефіцієнтів рівнянь (3.12) (3.13), отримаємо:

$$\omega_{nd} = \sqrt{K} \quad (3.14)$$

$$\zeta = \frac{1}{2T_D\sqrt{K}}, \quad (3.15)$$

Вибрати максимальне відсоткове значення перевищення  $\Delta h_{\max} = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$  рівне 2%,  $T_D=0.3$  вс, отримаємо  $\zeta=0,78$

max дорівнює 2%,D

Для розрахунку коефіцієнти регулятора ПІ використовуємо параметри синхронного генератора із постійними магнітами [8]  $k_{pd} = 0,45$ ,  $k_{id} = 0,1$

Застосовуючи також для струму  $i_{sq}$ , отримаємо параметри регулятора:  $k_{pq}=0,297$ ,  $k_{id}=0,109$ .

### 3.2 Розробка спостерігача крутного моменту

Спостерігача Луєнбергер: Розглянемо об'єкт із моделлю стану:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}, \quad (3.16)$$

Основна ідея методу проектування спостерігача Луєнбергера складається в тому, щоб використовувати систему з моделлю

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y} - Du) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases}$$

як спостерігач для отримання наближення  $\hat{x} \approx x$  принаймні через досить короткий інтервал часу  $T$ , тобто для отримання виразу  $\|e(t)\|_{\infty} = \|x(t) - \hat{x}(t)\|_{\infty} \approx 0$  коли  $t \geq T$ . На рисунку 3.4 представлена модель спостерігача стану Луєнбергера.

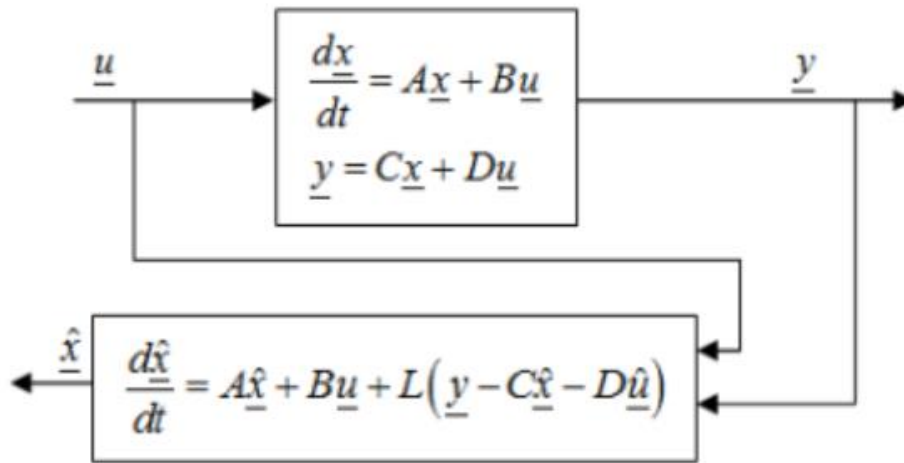


Рисунок 3.4 – Модель спостерігача стану Луенбергера

На основі двох моделей створено помилку:

$$\underline{e}(t) = \underline{x}(t) - \underline{\hat{x}}(t) \rightarrow \frac{d\underline{e}}{dt} = \frac{d(\underline{x} - \underline{\hat{x}})}{dt} = A(\underline{x} - \underline{\hat{x}}) - L(\underline{y} - C\underline{\hat{x}} - D\underline{u}) = A\underline{e} - L(C\underline{x} - C\underline{\hat{x}}) = (A - LC)\underline{e} \quad , \quad (3.17)$$

Так якщо  $\underline{e}(t) \rightarrow 0$  , то  $(A-LC)$  має бути стійкою матрицею. Чим швидше помилка  $\underline{e}(t)$  буде наближатися до нуля, тобто чим менший час  $T$ , необхідне спостереження за вхідним і вихідним сигналами, далі від уявної осі (в  $-\infty$ ) власні значення  $(A-LC)$ .

Спостерігача Калман: для спостерігача стану Луенбергера можемо виявити зміну стану  $\underline{x}(t)$  в об'єкті лише через певний час  $T$ . Це обмежило його застосовність, т. е. його можна використовувати лише тоді, коли обурення, що впливає на систему, є миттєвим, а інтервал часу між двома обуреннями не менше  $T$ .

Для того, щоб повністю усунути зазначену нестачу спостерігача Луенбергера, Калман запропонував враховувати участь шумових сигналів  $\underline{n}_x(t)$  і  $\underline{n}_y(t)$  об'єкта у процесі визначення примарної відповідності  $L$  спостерігача. Тобто модель опису об'єкта має показувати участь шумових сигналів. На рисунку 3.5 представлено модель спостерігача стану Калмана.



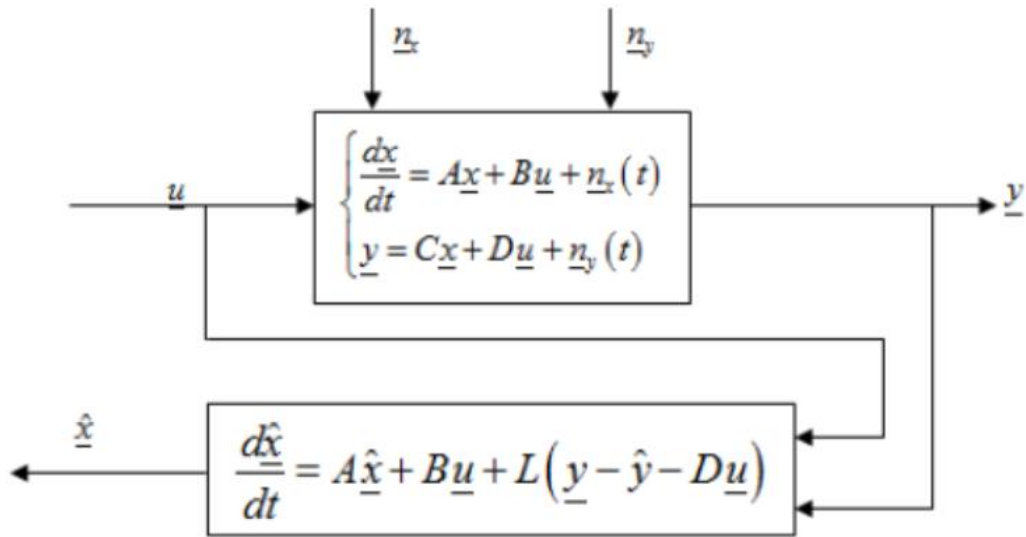


Рисунок 3.5 – Модель спостерігача стану Калмана

Спостерігачі стану Калмана має ту саму модель, що спостеріг стану Луенбергера, тобто

$$\frac{dz}{dt} = A\underline{z} + B\underline{u} + L(\underline{y} - C\underline{z} - D\underline{u}) \quad , \quad (3.18)$$

Так алгоритм визначення  $L$  для спостерігача стану Калмана складається з наступних кроків:

- 1) Визначати матрицю  $N_x$  і  $N_y$
- 2) Розробити оптимальний контролер, що реагує на стан ЛТ з негативним зворотним зв'язком для подвійних об'єктів:

$$\frac{dx}{dt} = A^T \underline{x} + C^T \underline{u} \quad , \quad (3.19)$$

І об'єктивна функція:

$$Q_K = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T N_x x + u^T N_y u) dt \quad , \quad (3.20)$$

- 3) Підставте знайдене  $L$  (3.18), щоб отримати спостерігача.

Моделювання спостерігача вітрового моменту розраховується так:

$$\dot{\omega} = -\frac{3p^2}{2J} \lambda_{i_{qs}} - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{j} T_L \quad , \quad (3.21)$$

Модель стану об'єкта:

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\hat{T}}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_r \\ \hat{T}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{3p^2}{2J} \\ 0 \end{pmatrix} i_{qs} \quad \text{або} \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}, \quad (3.22)$$

Модель спостерігача:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y} - Du) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases}, \quad (3.23)$$

$$\dot{e} = (A - LC)e, \quad (3.24)$$

де  $\hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{pmatrix}; e = x - \hat{x}; L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix}.$

На рисунку 3.6 представлений спостерігач вітрового моменту.

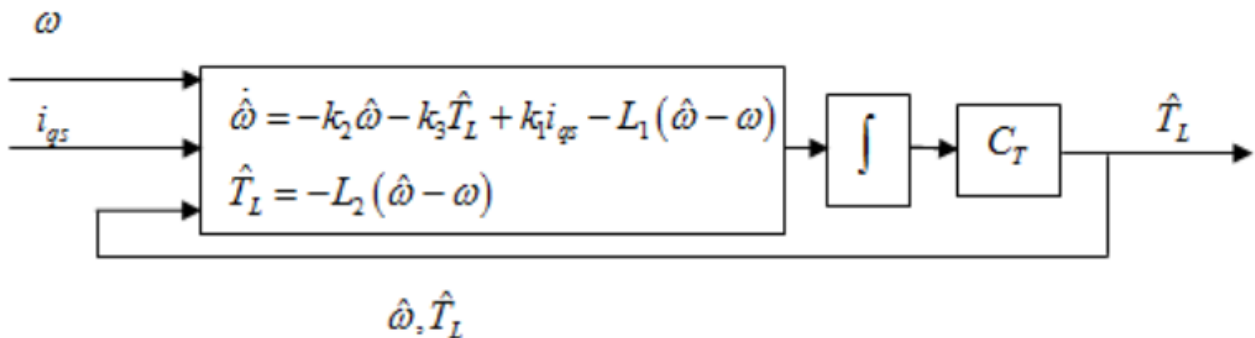


Рисунок 3.6 – Спостерігач вітрового моменту

### 3.3 Моделювання розробленої системи керування вітрогенератором

У цій частині представлено моделювання системи керування генератором з постійними магнітами.

На рисунку 3.7 показано блок-схему системи керування вітрогенератор.

В схемі є віротурбіна, електрогенератор, спостерігач крутного моменту, контролер, перетворювачі. Блок турбіни дає параметри механічної потужності (вітрової потужності), що вкладається у генератор. Вітровий момент від спостерігача надходить на контролер, сигнал керування проходить через інвертор, підключений до генератора.

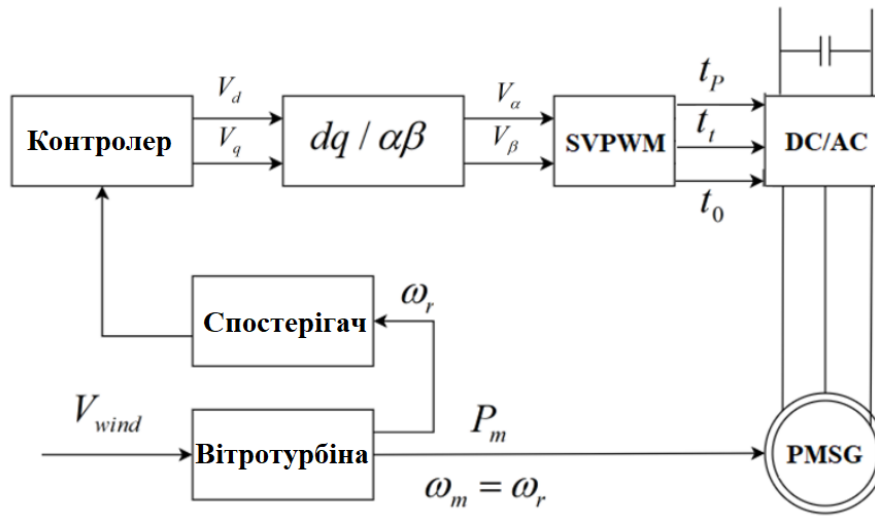


Рисунок 3.7 – Блок-схема системи керування вітрогенератором з використанням синхронного генератора з постійними магнітами

Схеми для виконання моделювання системи вітрогенератора Simulink показані на рисунках 3.8 – 3.14.

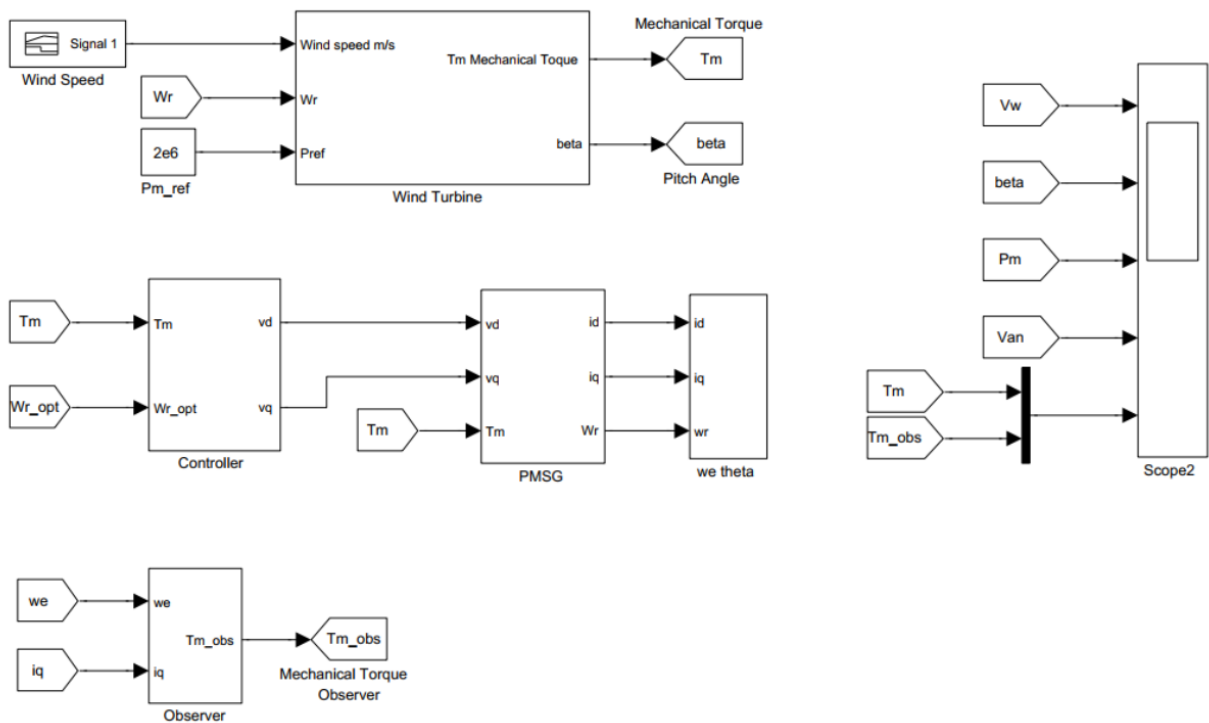


Рисунок 3.8 – Блок-схема система вітрогенератора Simulink

Параметри вітрогенератора [8]:

- Радіус ротора:  $R=38$  м
- Щільність повітря:  $\rho=1,205$  кг/м<sup>3</sup>
- Максимальний коефіцієнт потужності:  $C_{Pmax}=0.4421$
- Номінальна вітряна швидкість:  $V_{wrate}=11.8$  м/с

- Постійний коефіцієнт максимальної потужності:  $K_{p-opt} = 0.201 \text{ мВт}/(\text{рад/с})^3$

Параметри генератора [8]:

- Потужність:  $P_{Gen(rated)} = 2 \text{ МВт}$

- напруги:  $V_{Gen(rated)} = 4 \text{ кВ}$

- Номінальна частота обертання ротора:  $\omega_{r(rated)} = 2,18 \text{ рад/с}$

- номер активної пари:  $P = 11$

- Потік:  $\lambda = 136 \text{ Вб}$

- Індуктивність статора по осі d:  $L_d = 0,334 \text{ Н}$

- Індуктивність статора по осі q:  $L_q = 0,217 \text{ Н}$

- Опір статора:  $R_s = 0,08$

- Коефіцієнт тертя:  $B = 0,01$

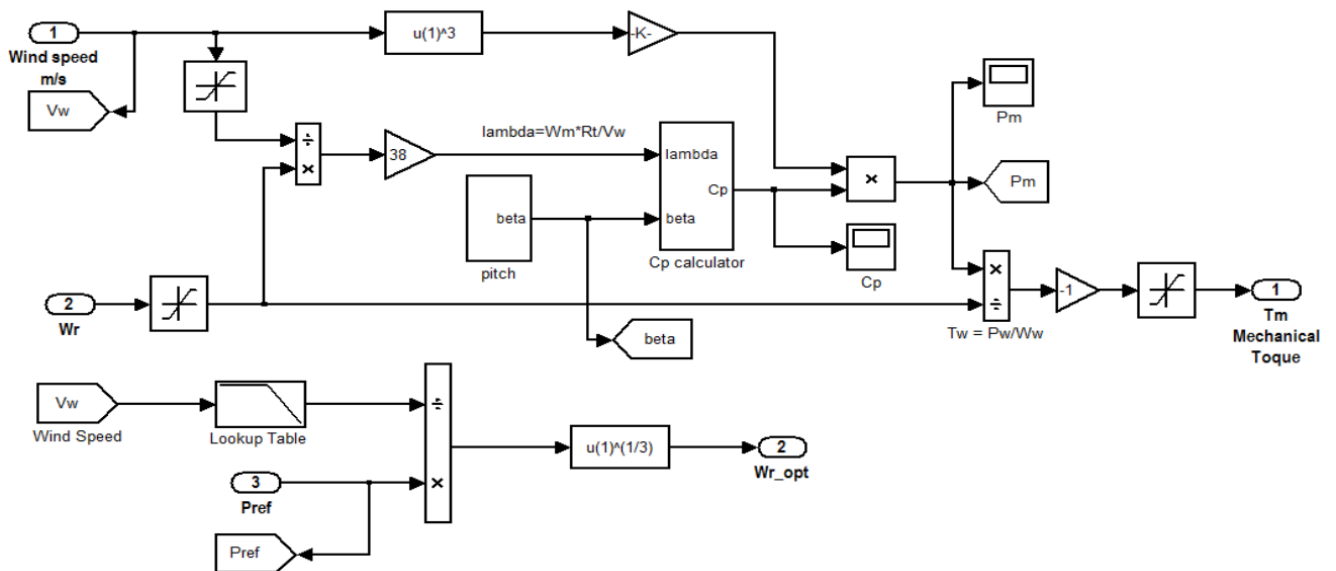


Рисунок 3.9 – Блок - схема вітряний турбін

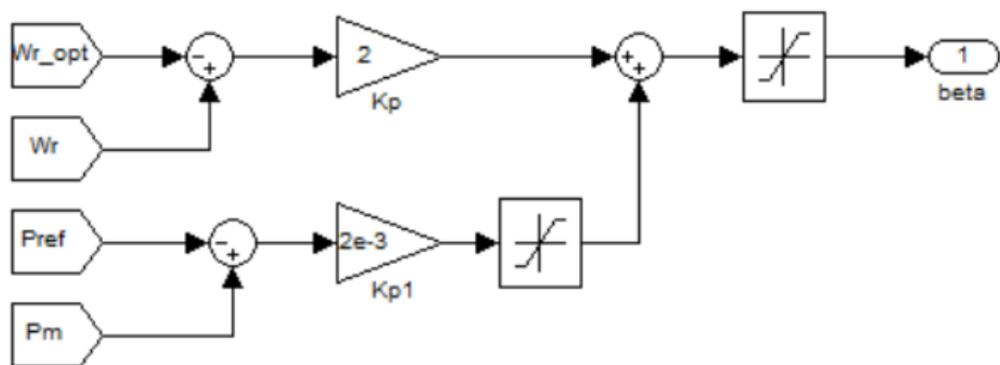


Рисунок 3.10 – Блок-схема системи керування кутом атаки

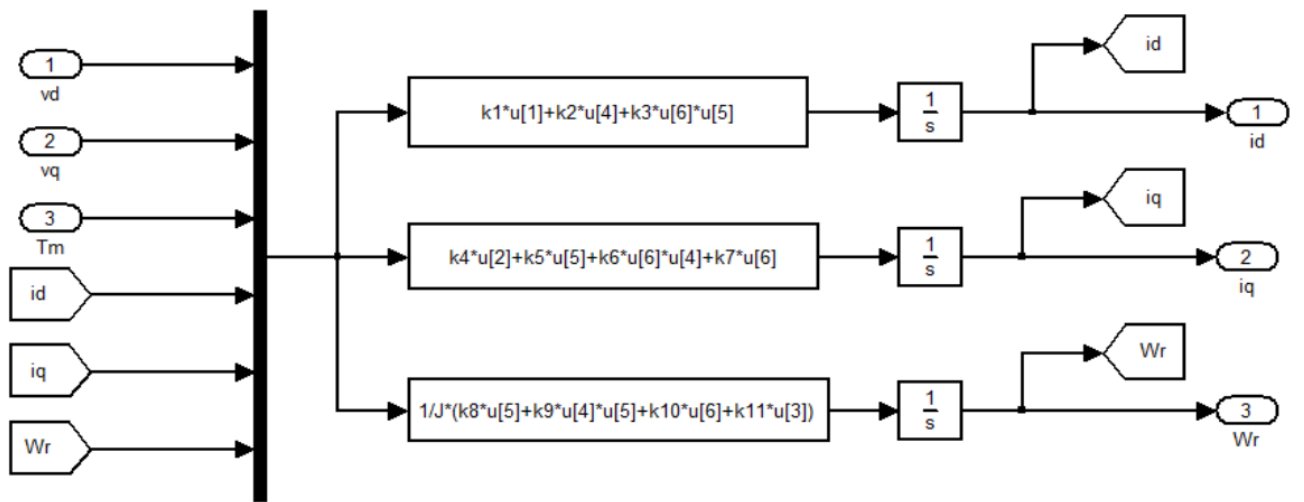


Рисунок 3.11 – Блок - схема синхронного генератора із постійними магнітами

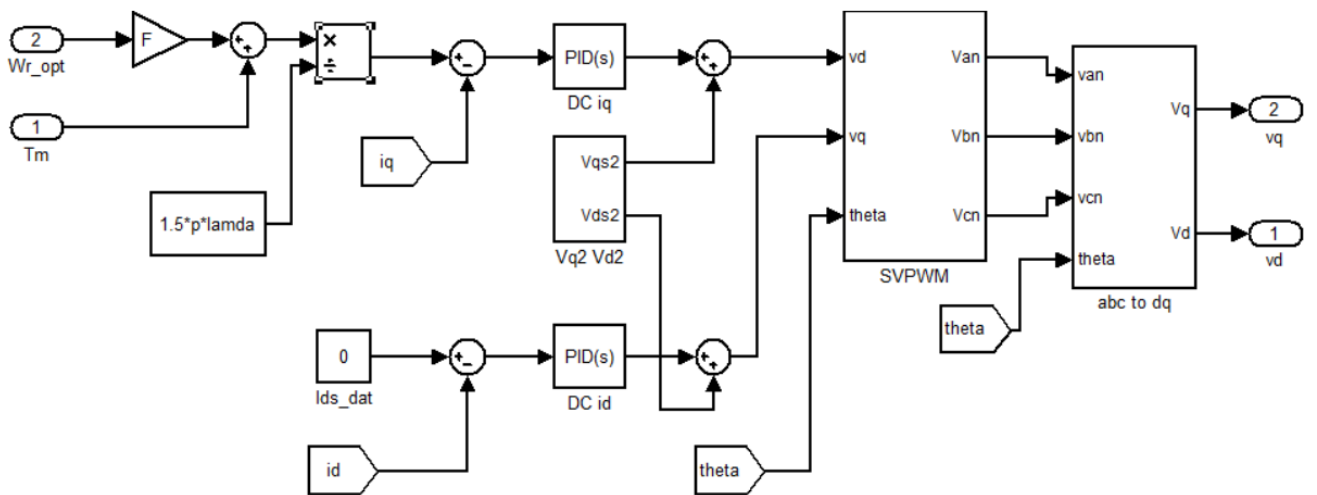


Рисунок 3.12 – Блок - схема системи керування генератора

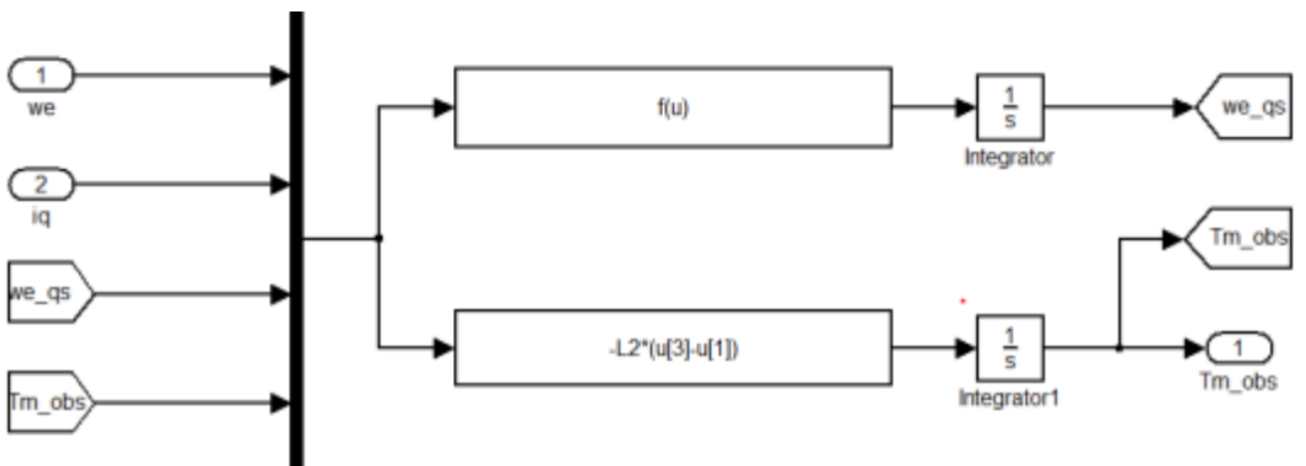


Рисунок 3.13 – Блок - схема спостерігача крутного моменту

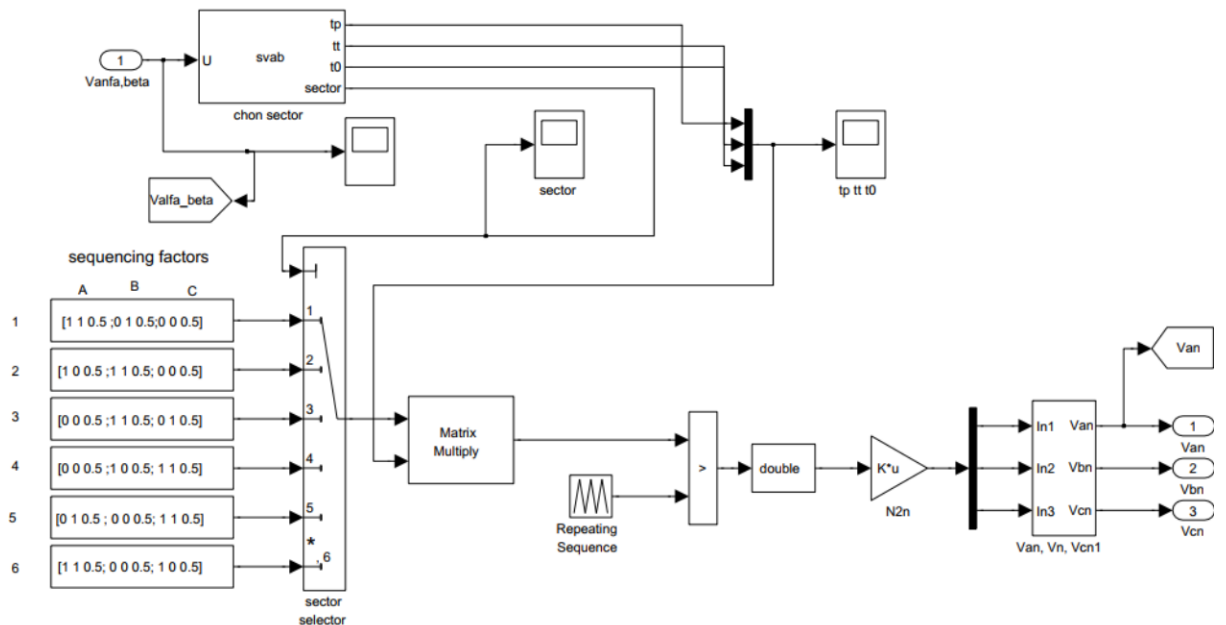


Рисунок 3.14 – Блок - схема просторово-векторного ШІМ кервання ДВИГУНОМ

### 3.4 Результат моделювання

На рисунку 3.15 представлені результати моделювання:

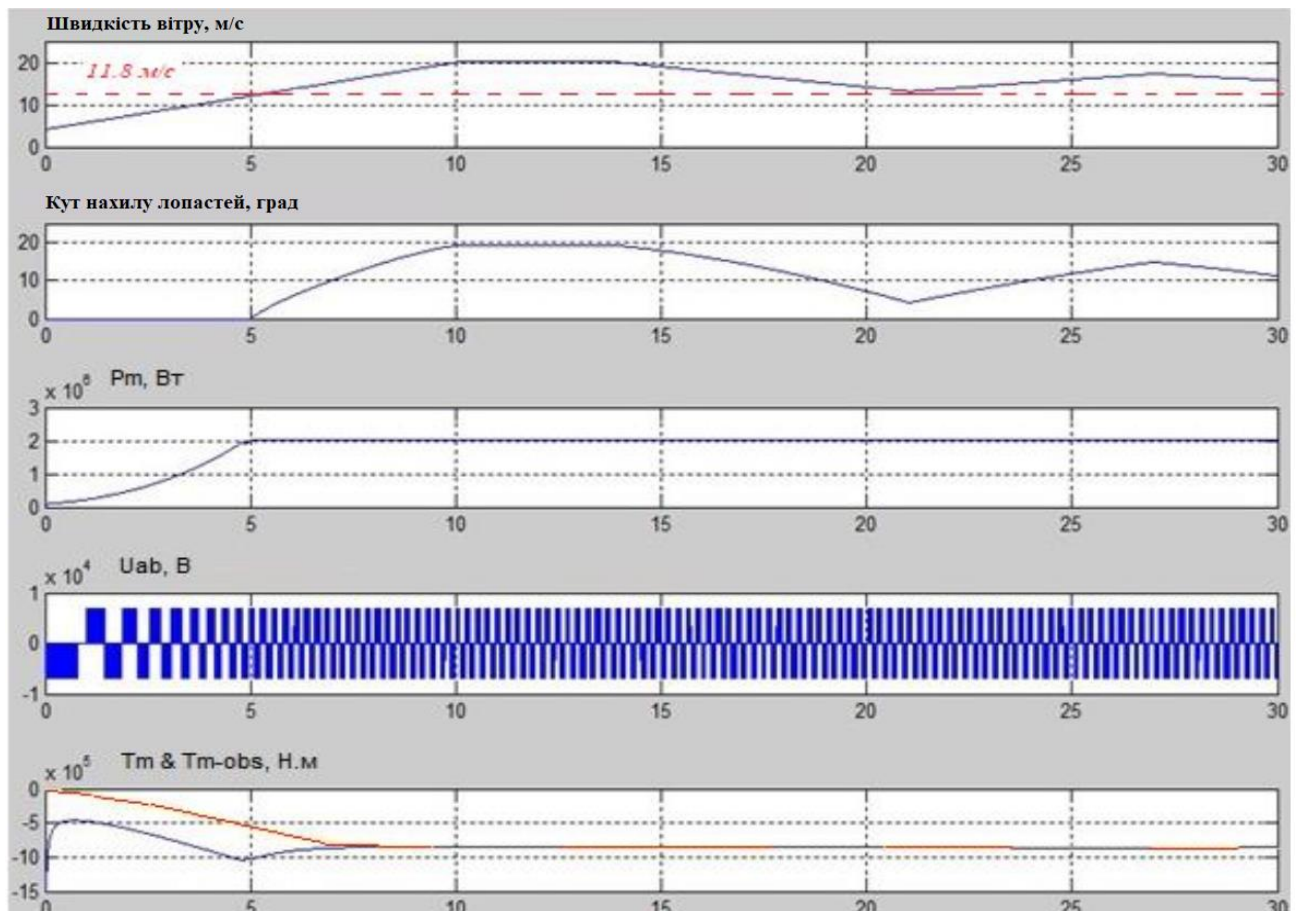


Рисунок 3.15 – Результати моделювання

Результати моделювання видно, що коли швидкість вітру змінюється кут атаки змінюється на відповідне значення кута. Тобто коли швидкість вітру підвищується від 4 м/с до 11,8 м/с (номінальна швидкість), то кут атаки дорівнює 0 і потужність генератора підвищується від 0 до 2 МВт; коли швидкість вітру вище 11,8 м/с, потужність генератора досягає максимальне значення 2 МВт (Максимальна потужність генератора).

Також спостерігач крутного моменту вітру добре працює в області, що перевищує номінальну швидкість вітру ( $> 11,8$  м/с), але час відгуку спостерігача ще довго не підходить для області швидкості вітру нижче номінальної швидкості, коли швидкість вітру змінюється швидко.

### **3.5 Висновки до розділу**

У цьому розділі проведено моделювання розробленої системи керування вітрогенератором в Simulink. На основі аналізів результатів показано залежність потужності від швидкості вітру та кут атаки. Ця система працює добре в області, яка перевищує номінальну швидкість вітру.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням [13, с. 76].

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його

проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядженню, але з обов'язковим записом в журналі



можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, крЗПильних елементів; справність вводів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що крЗПлять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електрик повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального

захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і потрiскуваннi всерединi трансформатора; ненормальному i постійно зростаючому нагрiваннi трансформатора при номiнальному навантаженнi i роботi пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розривi діафрагми вихлопної труби; течi масла з пониженням його рiвня нижче мiнiмально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі i повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів i правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

#### **4.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі**

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної i світлотехнічної галузі розуміють його спроможність в умовах надзвичайної ситуації випускати продукцію в запланованому обсязі та номенклатурі, а при отриманні середніх руйнувань або порушенні зв'язків з кооперації та поставок відновлювати виробництво у мiнiмальні терміни.

Під стійкістю роботи об'єктів, які безпосередньо не виробляють матеріальні цінності розуміють їх спроможність виконувати свої функції в умовах НС.

На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в умовах НС впливають наступні фактори:

- надійність захисту робітників та службовців;
- спроможність інженерно-технічного комплексу об'єкта протистояти у визначеному ступеню уражаючих факторів стихійного лиха, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;
- захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, зараження отруйними речовинами);

- надійність системи забезпечення об'єкта всім необхідним для виробництва (сировиною, паливом, комплектуючими вузлами і деталями, електроенергією, водою, газом та іншим);
- стійкість та безперервність керування виробництвом та ЦО;
- підготовленість об'єкта до ведення РіНР та робіт щодо порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців досягається чотирма основними способами:

- укриття людей в захисних спорудах;
- проведення евакозаходів;
- радіаційно-хімічний захист;
- медичний і біологічний захист.

Надійно захистити виробничий персонал об'єкта можливо лише при комплексному використанні усіх основних способів захисту.

Захист виробничих фондів полягає у підвищенні протидії будинків, споруд і конструкції об'єкта до уражаючих факторів та захисті технологічного обладнання, верстатів, систем і комунікацій та інших засобів, що формують основу виробничого процесу.

Створення надійних систем електро-, водо- та теплозабезпечення об'єктів:

а) підвищення стійкості електрозабезпечення:

- розподіл схеми електромереж на незалежно працюючі частини;
- за кільцювання електромереж та підключення їх до декількох джерел енергозабезпечення;
- створення резерву дизельних електростанцій;

б) підвищення стійкості систем водопостачання:

- водопостачання від двох незалежних джерел, одне з яких підземне;
- захист вододжерел та резервуарів чистої води;
- створення обвідних (байпасних) ліній навколо водонапірних веж;

в) підвищення стійкості систем газу, тепло- та паливо- забезпечення:

- розподільні газопроводи робити підземними та передбачати їх кільцювання;

- газорозподільні станції та опорні пункти обвідних газопроводів передбачати в підземному варіанті;

- встановлювати в основних вузлових точках систем автоматичні вимикаючі пристрої, які спрацьовують при аваріях.

Підвищення протипожежної стійкості:

- максимальне скорочення запасів палива та вибухонебезпечних речовин;
- проведення профілактичних протипожежних заходів;
- підготовка сил і засобів пожежогасіння.

Створення стійкості системи матеріально-технічного постачання. На об'єктах електротехнічної і світлотехнічної галузі створюють запаси сировини, палива, комплектуючих вузлів і деталей, обладнання, які дозволяють продовжувати роботу на випадок дезорганізації постачання.

Створення стійкості системи керування:

- підготовка ПУ (захищених);
- забезпечення ПУ засобами зв'язку;
- використання автоматизованої системи керування. Підготовка до прискореного (негайного) відновлення порушеного виробництва;
- розробка необхідної технічної та технологічної документації;
- створення запасів матеріальних засобів для встановлення робіт;
- розробка розрахунків сил і засобів для відновлюючих робіт;
- визначення вірогідної черговості робіт по відновленню виробництва з урахуванням наявних ресурсів та місцевих умов.

Крім того, на стійкість роботи підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі буде впливати наявність підготовленої робочої сили.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом:

- створення на об'єкті стійкої системи зв'язку;
- висока підготовка керівного складу;
- своєчасне прийняття вірних рішень та постановка завдань підлеглим у відповідності до обстановки, що склалася.

Підвищення стійкості роботи об'єкта електротехнічної та світлотехнічної галузі досягається завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних,

технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії уражаючих факторів і створення умов для ліквідації наслідків НС.

Інженерно-технічні заходи – це комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруд, обладнання, комунально-енергетичних, систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкті шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє спрощенню виробництва продукції та усуває можливість виникнення вторинних уражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного командно-начальницького складу штабу, служб і формування ЦО при захист робітників і службовців, проведенні РіНР, відновленні виробництва.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі можна зробити наступні висновки:

1. Розглянуто загальні відомості про вітроенергетику. Проведено аналіз конструкції та класифікації вітрогенераторів. Описані різні типи вітрогенераторів з їх типовими конструкціями, зокрема, вертикальні та горизонтально-осьові вітрогенератори. Представлено порівняння різних електрогенераторів. У результаті було вирішено вибрати до виконання дослідження систему з урахуванням синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ).

2. Представлено опис системи керування об'єктом, порівняння різних стратегій керування вітрогенератором, таких як:

- 1) на основі фіксованої швидкості та фіксованого кута атаки,
- 2) змінна швидкість та змінний кут атаки.

3. Проведено моделювання підсистем, що входять до системи керування вітрогенератора, таких як, аеродинамічна вітротурбіна, електрогенератор, система керування кутом атаки. Було удосконалено систему керування струмом генератора за допомогою ПД-регулювання, розроблено спостерігач крутного моменту.

4. Проведено моделювання розробленої системи керування вітрогенератором в Simulink. На основі аналізів результатів показано залежність потужності від швидкості вітру та кут атаки. Ця система працює добре в області, яка перевищує номінальну швидкість вітру. Таким чином, показано підвищення ефективності перетворення вітру вітрогенератором при використанні обраної системи керування і стратегії керування для конкретних умов роботи об'єкта

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Global wind report 2021. [Електронний ресурс]. - URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/#0>
2. S. Vijayalakshmi. Modelling and control of Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator / Vijayalakshmi.s S. Saikumar // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). - 2011. - Vol. 3 pp. 2277-2284.
3. Fatima Zohra Naama. Model and Simulation of Wind Turbine and its Associated Permanent Magnet Synchronous Generator / Abdallah Zegaoui, Yssaad Benyssaad // Energy Procedia. 2019. - Vol. 157. pp. 737-745.
4. Nicholas PW Strachan. Dynamic Modelling, Simulation and Analysis of Offshore Variable-Speed Directly-Driven Permanent-Magnet Wind Energy Conversion and Storage System (WECSS)/, Nicholas PW Strachan, Dragan Jovcic // IEEE Trans. Energy Conversion - 2007. pp. 1-6.
5. Alejandro Rolán, Álvaro Luna, Gerardo Vázquez, Daniel Aguilar, Modeling of Variable Speed Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator/, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009. pp. 734-739.
6. Dynamic Models for:- URL: <https://bitly.com.vn/fzdodj//>.
7. Jackson G.Njiri, Dirk Soffker, State-of-the-art y wind turbine control: Trends and challenges // Renewable i Sustainable Energy Reviews, 2016, Vol. 60, pp 377-393.
8. Ming Cheng, Ying Zhu, State of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review // Energy Conversion and Management, 2014. pp. 332-347.
9. Wind Turbine Control Systems: - URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/1-84628-493-7>
10. France: wind energy solution в energy transition // Ewea blog. Breath of FRESHAIR.: URL: <http://www.ewea.org/blog/2014/04/france-wind-energy-solution-energy-transition/>.

11. New US study says 'wind turbine syndrome' does not cause health problems // Ewea blog. Breath of FRESHAIR.: -  
URL:<http://www.ewea.org/blog/2012/01/new-us-study-says-wind-turbine-syndrome-does-not-cause-health-problems/>

12. While generating green electricity, wind power might also help crops // Ewea blog. Breath of FRESHAIR:- [URL:http://www.ewea.org/blog/2011/01/while-generating-green-electricity-wind-power-might-also-help-crops/](http://www.ewea.org/blog/2011/01/while-generating-green-electricity-wind-power-might-also-help-crops/).

13. MATLAB. Simulink:- URL <https://coderlessons.com/tutorials/kompiuterno-programmirovanie/uznaite-matlab/matlab-simulink>.