

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М.БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

на тему:

**«Система керування режимами роботи вітрогенератора
потужністю 300 кВт»**

Виконав: студент 3 курсу,
групи НВДЕ-2023у
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії)

 **М. К. Попов**

Керівник  **О.Б. Єгоров**

Рецензент  **М.Л. Глєбова**

Харків - 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки

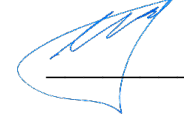
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри АЕЕ



доц. **О.Б. Єгоров**

“ 15 ” 06 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Попову Микиті Костянтинівичу

1. Тема проєкту: «Система керування режимами роботи вітрогенератора потужністю 300 кВт»

керівник проєкту Єгоров Олексій Борисович, к.т.н., доцент

затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05. 2026 року № 440-03.

2. Строк подання студентом проєкту 14 червня 2026 року.

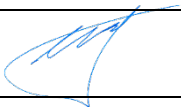
3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Дані режимів роботи генераторів, характеристики постійних магнітів, ДСТУ 2843-94, ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні, Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Стан питання та завдання дослідження, Математичне моделювання системи управління вітрогенераторів, Прогноз вихідної потужності вітрогенератора, Розробка математичної моделі блоку управління кутом атаки багатолопатевого вітрогенератора, Охорона праці.

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

- 1) Цілі та завдання проєктування.
- 2) Алгоритми роботи блоків керування вітроустановок
- 3) Конструктивна схема вітроустановки
- 4) Прогноз вихідної потужності вітрогенератора.
- 5) Важільна система управління
- 6) Режими управління положенням лопатей вітрогенератора

6. Консультанти розділів проєкту

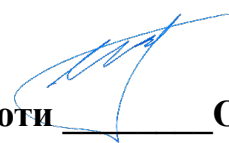
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Єгоров О.Б., доц. каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доц. каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 25 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз конструкцій вітрогенераторів	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Вибір об'єкту альтернативного електропостачання. Математичне моделювання ВЕУ	31.05.2026-05.06. 2026	
3	Розробка заходів з охорони праці	07.06.2026-10.06. 2026	
4	Підготовка та подання дипломного проєкту до захисту.	11.06. 2025-14.06. 2025	

Студент  М. К. Попов

Керівник роботи  О.Б. Єгоров

ЗМІСТ		
	ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ	5
	ВСТУП	6
Глава 1	СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1	Аналіз енергетичних систем	9
1.2	Алгоритми роботи блоків керування вітроустановок	14
1.3	Система діагностики основних вузлів вітрогенераторів у складі блоку керування	18
1.54	Висновки	27
Глава 2	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ	29
2.1	Математична модель вітрового потоку	29
2.2	Прогноз вихідної потужності вітрогенератора	32
2.3	Розробка математичної моделі блоку управління мехатронної системи шестилопатевого вітрогенератора «ВІНД ГЕНЕРАТОР В-1000»	41
2.4	Розробка математичної моделі блоку управління кутом атаки багатолопатевого вітрогенератора	56
2.5	Висновки	63
Глава 3	ОХОРОНА ПРАЦІ	67
	ВИСНОВКИ	79
	Список джерел	81
	ДОДАТОК	84

ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

IRENA - Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики

СЕУ - сонячна енергетична установка

ВЕУ - вітрова енергетична установка

ККД - Коефіцієнт корисної дії

ХХ - Холостий хід

Кв - коефіцієнт використання енергії вітру

АКБ - акумуляторна батарея

АЧХ - Амплітудно-частотна характеристика

ВВВ - вертикально-осьовий вітрогенератор

ВСТУП

Актуальність теми На сьогоднішній день у всьому світі є високий попит на низьку за вартістю вітроенергетичну установку малої потужності, де система управління потужністю максимально спрощена [1]. У такій установці розраховують параметри ротора за заданої швидкості вітру і постійною частотою обертання генератора. Завдяки цьому можливе застосування асинхронного генератора для підключення безпосередньо до мережі або синхронного з постійними магнітами в автономних вітроенергетичних установках для підзарядки акумуляторної батареї. У такому виконанні лопаті нерухомі, тому немає можливості регулювати кут установки для налаштування частоти обертання ротора під швидкість вітру. Головним недоліком таких систем є те, що при перевищенні максимально допустимого значення швидкості вітру, проводиться відведення лопатей від цього потоку, що не забезпечує безперервного використання вітрового потенціалу для перетворення його в електричну енергію. На сьогоднішній день Україна дотримується міжнародних тенденцій розвитку в галузі енергетики [2]. Відповідно до цієї концепції частка відновлюваної енергії у країні до 2020 року становить 3% від загального обсягу виробництва електроенергії, а до 2030 року має становити 10%, до 2050 року - 50% [3]. Цей прогноз ґрунтується на наявному потенціалі альтернативних джерел енергії. На сьогоднішній день спостерігається розвиток та удосконалення механічної частини та електронних схем управління вітрогенераторів та з'являються нові методи управління ними. Наприклад, застосовуються методи керування вітрогенератором при фіксованих частотах обертання ротора. Суть такого підходу полягає в перемиканні обмоток генератора або зміні передавального числа мультиплікатора. Також використовуються режими роботи зі змінною частотою обертання, при яких керування здійснюється за рахунок зміни геометрії ротора, регулювання кута атаки вітрового потоку на лопаті або застосування регулятора потужності.

Найбільш простим способом регулювання вихідної потужності вітрогенератора є керування за постійної частоти обертання. До його недоліків відносяться обмежена ефективність роботи у вузькому діапазоні швидкостей вітру, а також складність забезпечення захисту при перевищенні номінальної швидкості вітру.

Існує також метод керування, близький до систем із постійною частотою обертання вітроколеса, однак, на відміну від традиційного підходу, у даному випадку здійснюється зміна вихідної напруги генератора залежно від швидкості вітрового потоку. Застосування такого методу дозволяє підвищити ефективність роботи вітрогенератора в широкому діапазоні експлуатаційних умов.

Разом із тим реалізація зазначеного способу керування супроводжується низкою технічних обмежень. Зокрема, виникає необхідність використання систем вимірювання швидкості вітру, що ускладнює структуру системи керування. Крім того, надійність електронної частини вітроенергетичної установки може знижуватися внаслідок застосування комутаційних механізмів у колах обмоток генератора. Додатковою проблемою є забезпечення ефективного захисту вітрогенератора у разі перевищення номінальної швидкості вітрового потоку.

Одним із перспективних методів регулювання вихідної потужності є зміна кута атаки лопатей шляхом керування параметрами вітроколеса. Даний метод передбачає використання автоматизованих механізмів керування механічною частиною вітрогенератора відповідно до змін швидкості вітру. Регулювання кута атаки забезпечує підтримання оптимального режиму роботи установки, підвищення коефіцієнта використання енергії вітрового потоку та зменшення механічних перевантажень на елементи конструкції [4].

Результати досліджень показують, що впровадження автоматизованої системи керування дозволяє суттєво підвищити енергоефективність роботи вітроенергетичних установок. Зокрема, використання даного підходу забезпечило економію електричної потужності, еквівалентну роботі трьох вітрогенераторів

номінальною потужністю 10 кВт для відповідного промислового об'єкта.

Об'єкти дослідження – вертикально-осьовий багатолопатевий вітрогенератор.

Методологічна база наукових досліджень

У процесі виконання досліджень у даній роботі було застосовано комплекс наукових методів, що включає аналіз та узагальнення науково-технічної літератури, теоретичні методи дослідження, методи математичного та комп'ютерного моделювання, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних. Під час розроблення програмного забезпечення використовувалися підходи об'єктно-орієнтованого програмування, що забезпечило модульність, гнучкість та можливість подальшого вдосконалення створених програмних рішень.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні двох моделей системи автоматизованого керування положенням лопатей вертикально-осьових багатолопатевих вітрогенераторів. Запропонована система керування забезпечує підвищення ефективності функціонування вітроенергетичних установок порівняно з існуючими аналогами за рахунок оптимізації режимів роботи та більш

Передбачено можливість застосування діагностичного блоку для вітрогенераторів різних типів без необхідності модифікації програмного забезпечення, що підвищує універсальність і практичну цінність розробленої системи.

Розроблена система діагностики основних вузлів вітрогенераторів, об'єднаних у єдину мережу, забезпечує контроль технічного стану кожного окремого агрегату в складі загальної енергетичної системи. Це дозволяє оператору своєчасно отримувати інформацію про виникнення несправностей або відхилень у роботі окремих вузлів конкретних вітроенергетичних установок, що сприяє підвищенню надійності експлуатації обладнання та зниженню ризику аварійних ситуацій.

Глава 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз енергетичних систем

1.1.1 Основні відомості світових систем енергозабезпечення

В даний час Україна розвивається відповідно до світових тенденцій в енергетичній сфері. Для формування достовірного прогнозу розвитку енергетики необхідно враховувати глобальні процеси, що відбуваються у світовій галузі. Таку інформацію мають міжнародні організації, включаючи Міжнародне енергетичне агентство, ООН, Світовий банк, а також великі транснаціональні компанії.

Основним показником під час прогнозування енергоспоживання є попит на енергію, який безпосередньо пов'язаний із чисельністю населення. Однак на точність прогнозу впливають і інші важливі фактори: загальний стан економіки країни, рівень енергоспоживання на душу населення, енергоємність виробництва, людський фактор, а також структура населення з професійної діяльності та інших характеристик. Всі ці параметри здатні суттєво впливати на рівень споживання енергії різними групами населення. При цьому зростання енергоспоживання на душу населення часто розглядається як один із індикаторів підвищення якості життя та добробуту, відбиваючи вплив економічного розвитку на рівень життя суспільства.

Інтенсивність використання електроенергії на одиницю внутрішнього валового продукту безпосередньо пов'язана з рівнем технологічного розвитку. Таким чином, при аналізі необхідно враховувати три ключові показники. За прогнозами ООН, до 2040 року чисельність населення світу досягне близько 9 млрд осіб, при цьому найбільший приріст очікується у країнах Африки, Азії та Індії. В результаті азіатський регіон стане найбільш густонаселеним і

характеризуватиметься максимальним попитом на енергоресурси.

Розвиток технологій неминуче значно впливає на енергетичну галузь. Водночас одним із найактуальніших завдань сучасного енергетичного сектору залишається енергозбереження, яке має як економічні, так і екологічні передумови та стимулює впровадження інновацій. При цьому багато прогнозів будуються на припущенні про відсутність кардинальних технологічних проривів в енергетиці в найближчій перспективі.

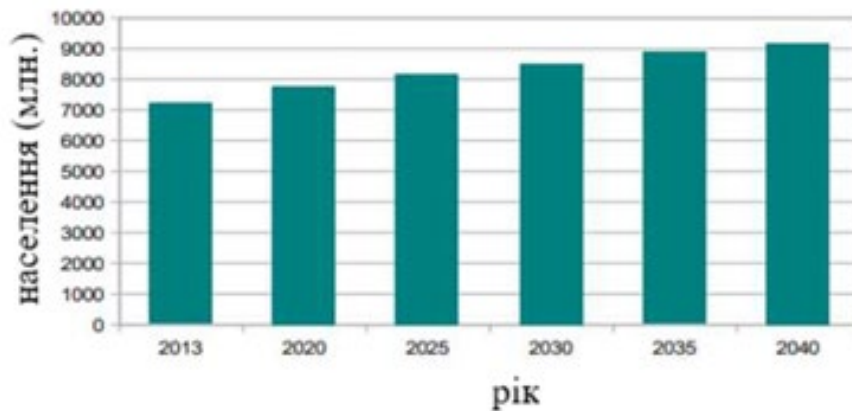


Рисунок 1.1 – Прогноз зростання населення світу за даними ООН

Очікується зниження енергоємності ВВП душі населення майже 1,5 разу до 2040 року (рисунок 1.3).

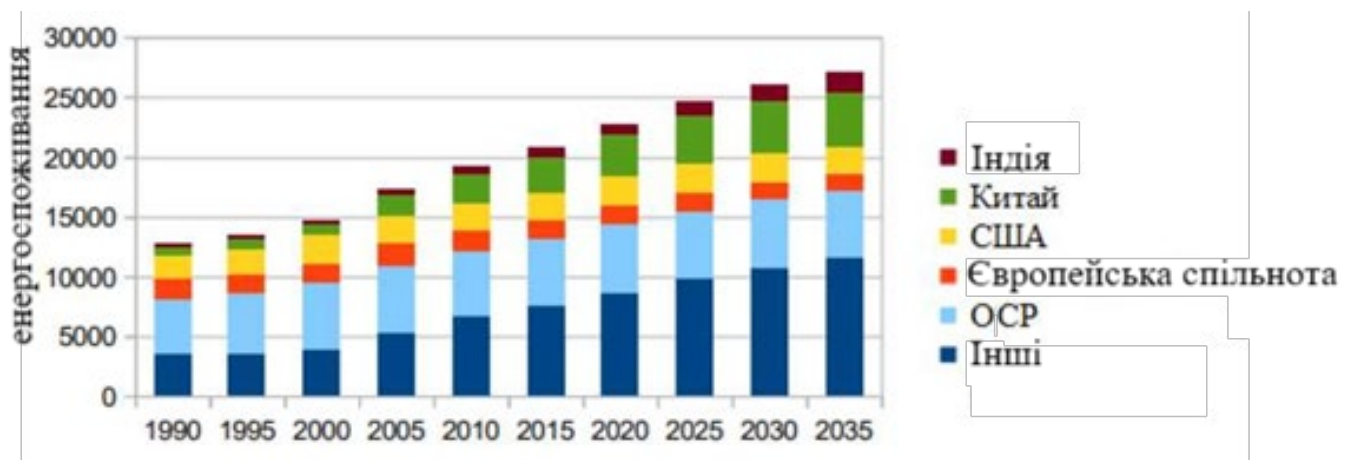


Рисунок 1.2 - Споживання енергії в регіонах

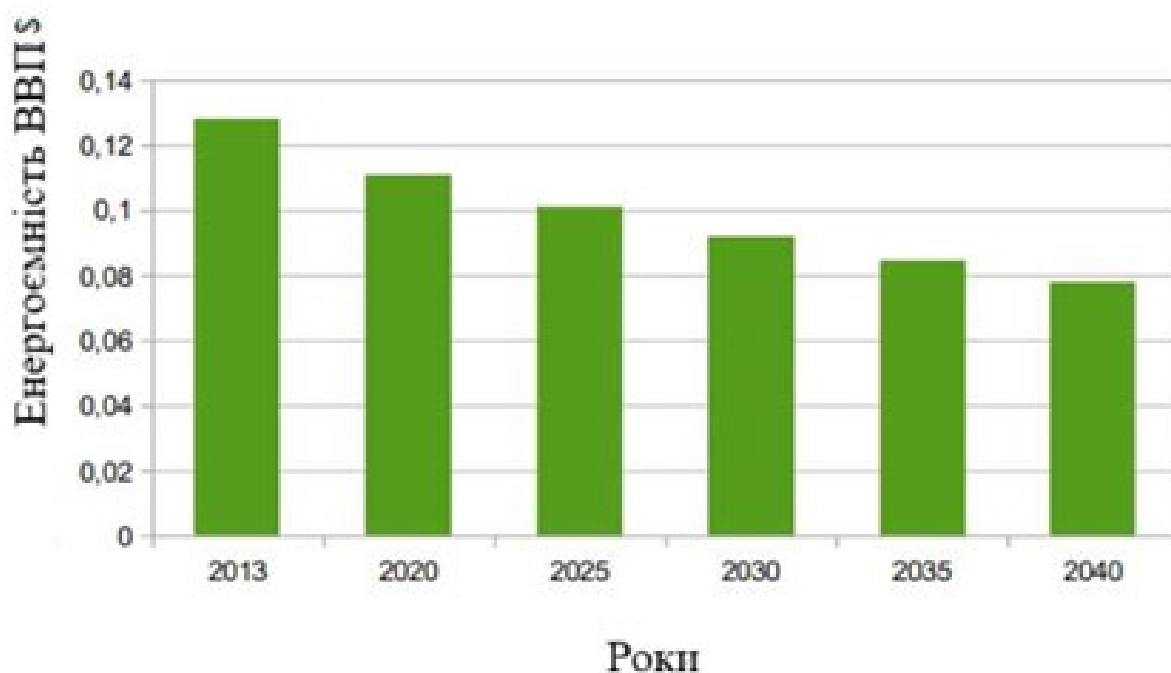


Рисунок 1.3 – Динаміка енергоємності ВВП

Але через зростання населення загальне електроспоживання зростатиме (рисунок 1.4). Споживання енергії душою населення є ключовим чинником якості життя, і цей показник зростатиме з 1,88 до 1,92 на людину.

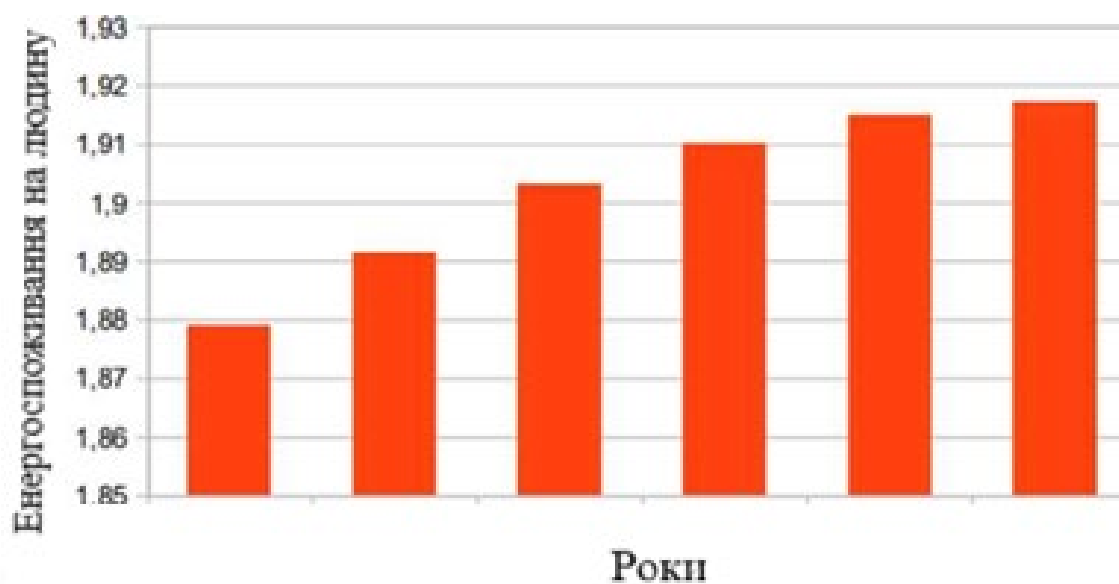


Рисунок 1.4 - Споживання енергії душою населення

Також важливо розглянути прогноз структури енергоспоживання у світі. Екологічні, економічні проблеми та технічний прорив у галузі певних джерел енергії змінять структуру споживання енергії протягом кількох десятиліть. Частка вуглеводнів буде знижена і очікується велике зростання відновлюваних джерел та ядерної енергії (рисунок 1.5).

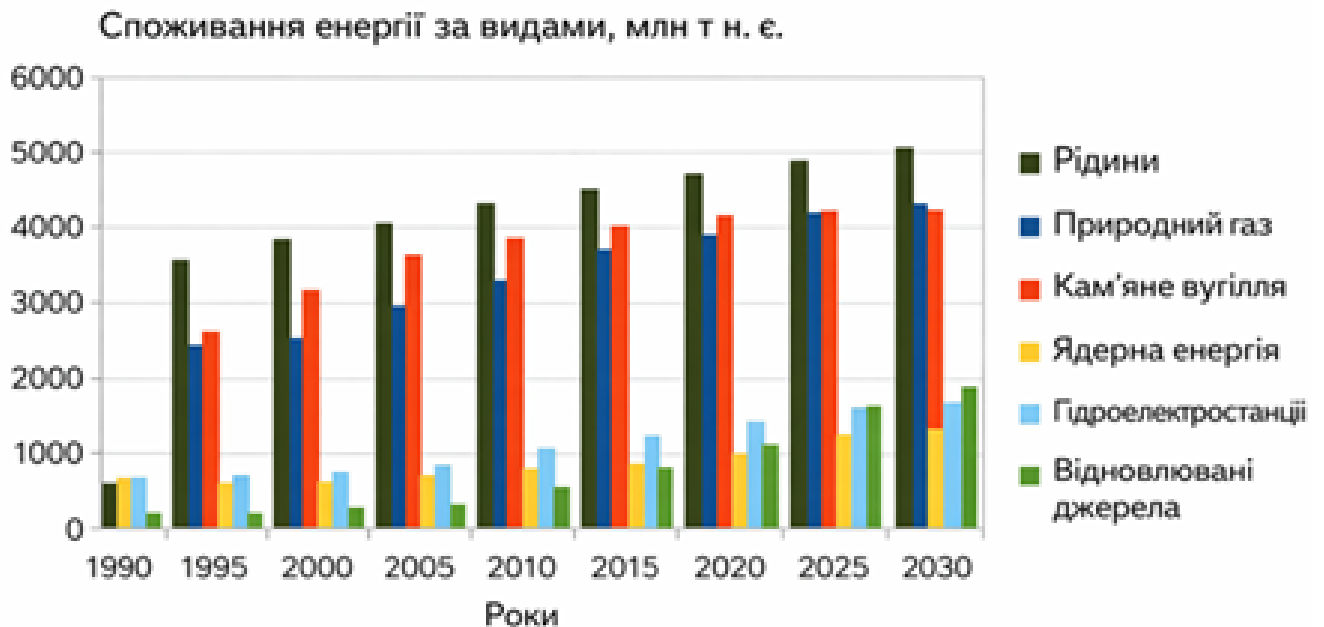


Рисунок 1.5 – Структура споживання енергетичного сектора за видами палива.

Розглянемо прогноз структури виробництва енергії у світі. У зв'язку зі зростанням попиту споживання енергії необхідно встановити додаткові електростанції (рисунок 1.6).

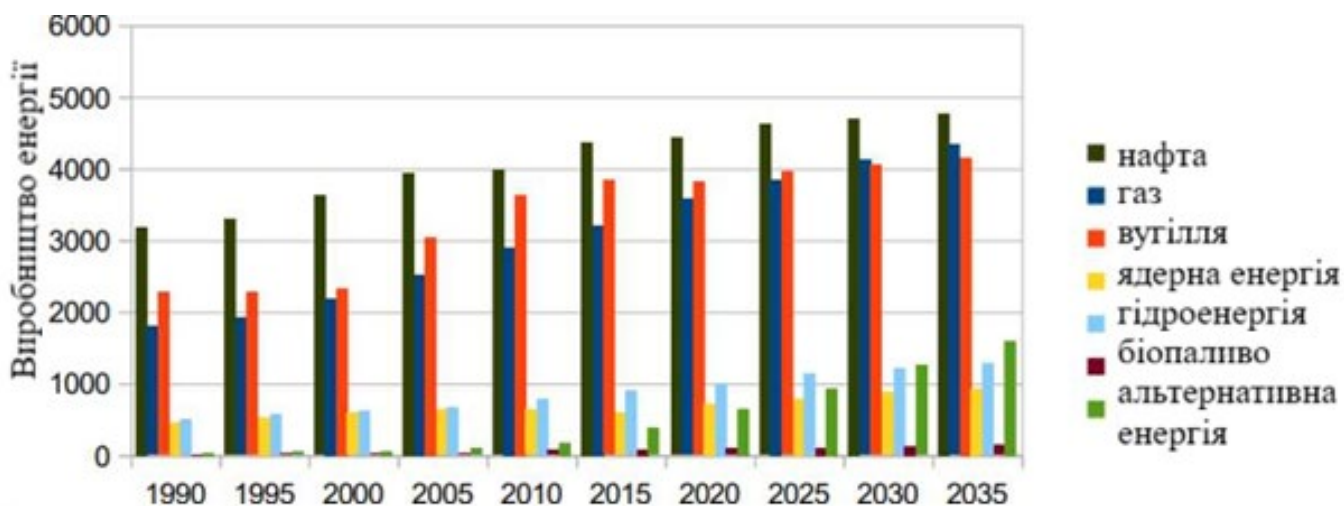


Рисунок 1.6 – Структура виробництва в енергетичному секторі за прогнозом ВР

Частка відновлюваних джерел енергії також зростатиме (рис. 1.7).

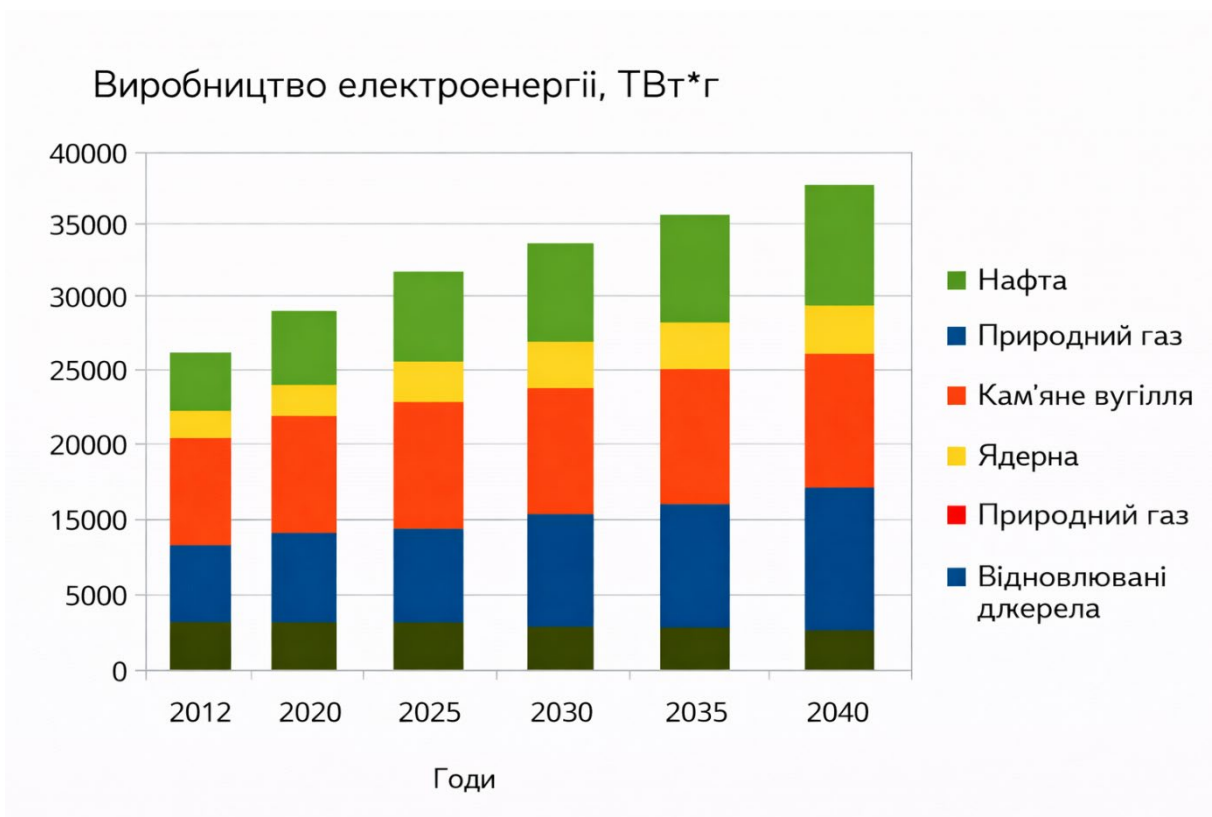


Рисунок 1.7 – Структура виробництва в енергетичному секторі за даними управління енергетичної інформації США (EIA)

1.2 Алгоритми роботи блоків керування вітроустановок

В даний час існує постійний попит на недорогі вітроенергетичні установки малої потужності з максимально спрощеною системою управління. У таких установках параметри ротора розраховуються для заданої швидкості вітру за постійної частоти обертання генератора. Це дає можливість використовувати асинхронні генератори з прямим підключенням до мережі або синхронні генератори з постійними магнітами в автономних установках для заряджання акумуляторів. У подібних конструкціях лопаті є нерухомими, що унеможливорює зміну кута їх установки залежно від швидкості вітру та частоти обертання ротора. Основним недоліком таких систем є те, що при перевищенні допустимої швидкості вітру лопаті виводяться з потоку, що не дозволяє безперервно використовувати енергію вітру для її перетворення в електричну.

У той же час нині спостерігається активний розвиток механічної частини та електронних систем управління вітрогенераторів, а також впроваджуються нові методи управління вітроенергетичними установками. Зокрема, використовуються установки з фіксованими частотами обертання ротора, що досягається шляхом перемикання обмоток генератора або зміни передавального числа мультиплікатора. Також застосовуються режими роботи зі змінною частотою обертання, при яких керування здійснюється за рахунок зміни геометрії ротора, регулювання кута атаки вітрового потоку на лопаті або за допомогою регуляторів потужності.

Метод керування вихідною потужністю вітрогенератора при постійній частоті обертання.

Найбільш простим способом регулювання вихідної потужності є керування при постійній частоті обертання. Такі вітрогенератори з'єднують вітроколесо з синхронним генератором, обмотки якого підключаються до діодного мосту, а вихід до акумуляторної батареї. При зміні швидкості вітру

змінюється вихідна напруга генератора. При малих швидкостях вітру напруга виявляється нижче за напругу акумулятора, що призводить до зниження струму заряду і зменшення електромагнітного моменту на валу. При збільшенні швидкості вітру зростає частота обертання, підвищується напруга генератора та струм, що надходить на акумулятор. Це призводить до зростання електромагнітного моменту, внаслідок чого вітроколесо не може перевищувати задану частоту обертання.

До основних переваг методу належать:

низька матеріаломісткість за рахунок відсутності необхідності в редукторі та механізмах регулювання кута атаки лопатей;

можливість застосування генераторів із постійними магнітами, що не потребують збудження;

простота та дешевизна електронного обладнання, оскільки перетворення може бути реалізовано на основі діодного мосту.

Недоліки методу:

ефективна робота можлива лише в обмеженому діапазоні швидкостей вітру;

виникають складнощі із захистом установки при перевищенні номінальної швидкості вітру.

Метод керування вихідною потужністю шляхом ступінчастої зміни частоти обертання

Даний метод близький до попереднього, проте відрізняється тим, що передбачає зміну вихідної напруги генератора в залежності від швидкості вітру, що забезпечує більш ефективну роботу установки в широкому діапазоні режимів.

Переваги методу:

розширений діапазон швидкостей вітру, за яких можлива генерація електроенергії;

Можливість використання щодо простих перетворювальних пристроїв завдяки застосуванню електромеханічного перемикачання обмоток генератора.

Недоліки методу:

необхідність використання систем виміру швидкості вітру;
зниження надійності через застосування комутаційних механізмів;
наявність проблем із захистом при перевищенні допустимих швидкостей вітру.

Метод керування вихідною потужністю при змінній частоті обертання

Швидкість вітру є змінною величиною, і в даному методі не використовується зміна кута атаки лопатей. Його принцип заснований на тому, що максимальна ефективність досягається за зміни частоти обертання вітроколеса. При цьому використовується поняття швидкохідності - відношення лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості вітру. До кожного вітрогенератора визначається оптимальне значення цього параметра. Суть методу полягає у підтримці постійного значення швидкохідності за зміни швидкості вітру за рахунок регулювання частоти обертання.

Зміна частоти обертання ротора призводить до зміни швидкості обертання генератора, тому для коректної роботи необхідний перетворювач, що забезпечує перетворення змінного струму на постійний. Це дозволяє підтримувати потрібний режим роботи та забезпечувати навантаження необхідною потужністю.

Переваги методу:

висока ефективність у широкому діапазоні швидкостей вітру;
порівняно проста конструкція, в якій основна функція регулювання покладена на перетворювач;
наявність захисту генератора від перевантажень за перевищення номінальної швидкості вітру.

До недоліків відносяться:

необхідність застосування анемометра для вимірювання швидкості вітру; ускладнення електронної частини установки та підвищення вимог до надійності та безпеки перетворювальних пристроїв. Метод управління мехатронною системою вітрогенератора шляхом зміни геометричних параметрів

Ще одним варіантом управління вихідною потужністю є метод зміни кута атаки на лопатях шляхом зміни параметрів вітроколеса. Даний метод передбачає використання різних механізмів, де здійснюється автоматизоване керування механічною частиною вітрогенератора відповідно до зміни значення швидкості вітру [7].

До переваг даного способу можна віднести:

- завдяки використанню пристроїв керування механічною частиною системи забезпечується ефективна робота вітрогенератора у великому діапазоні швидкостей вітру;
- Цей метод дозволяє налагодити режими роботи вітрогенератора, що забезпечує захист при сильних вітрах.

До недоліків даного методу належать:

- необхідність використання складних механізмів та додаткових систем автоматики;
- більш висока вартість вітроенергетичної установки за рахунок ускладнення конструкції та відповідно більшої матеріаловитратності .

Метод керування мехатронною системою вітрогенератора шляхом зміни кута атаки вітру на лопатях

Ще одним варіантом управління вихідною потужністю є метод зміни кута атаки на лопатях шляхом зміни параметрів вітроколеса. Даний метод передбачає використання різних механізмів, де здійснюється автоматизоване керування механічною частиною вітрогенератора відповідно до зміни значення швидкості вітру [8].

До переваг даного способу можна віднести:

- завдяки використанню пристроїв керування механічною частиною системи забезпечується ефективна робота вітрогенератора у великому діапазоні швидкостей вітру;
- Цей метод дозволяє налагодити режими роботи вітрогенератора, що забезпечує захист при сильних вітрах.

До недоліків даного методу належать:

- необхідність використання складних механізмів та додаткових систем автоматики;
- більш висока вартість вітроенергетичної установки за рахунок ускладнення конструкції та відповідно більшої матеріаловитратності .

1.3 Система діагностики основних вузлів вітрогенераторів у складі блоку керування

Сьогодні однією з актуальних проблем є висока вартість технічного обслуговування вітрогенераторів, що з їх віддаленим розташуванням від населених пунктів, і навіть значної висотою установки турбін [9]. У цьому розділі розглядається один із підходів до зниження витрат на планове обслуговування за рахунок розробки системи дистанційного моніторингу стану основних вузлів вітрогенератора. Використання технологій інтернету речей дозволяє здійснювати безперервний контроль технічного стану устаткування режимі реального часу.

Така система дає можливість своєчасно виявляти погіршення стану компонентів та інформувати оператора, що перебуває у будь-якій точці світу за наявності інтернет-з'єднання, про необхідність проведення ремонту або заміни окремих елементів. Це дозволяє зменшити час простою установок, підвищити їхню продуктивність, а також скоротити кількість виїздів обслуговуючого персоналу до місця розміщення вітрогенераторів для проведення діагностичних

робіт.

В даний час спостерігається стійке зростання використання вітрової енергії у світі [10], що сприяє покращенню екологічної обстановки та частковому вирішенню проблеми виснаження природних ресурсів. Як правило, вітрогенератори розміщуються у віддалених районах – на морських узбережжях, у гірській або горбистій місцевості, де забезпечуються найбільш сприятливі вітрові умови. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування складніших конструкцій, що включають безліч електромеханічних систем, технічний стан яких потребує постійного контролю.

Експлуатація вітрогенераторів без системи моніторингу не забезпечує їхньої максимальної ефективності та надійності. Найбільш ефективна робота досягається при об'єднанні окремих установок, оснащених системами діагностики, в єдину мережу дистанційного моніторингу. У зв'язку з цим перед розробкою такої мережі необхідно визначити перелік вузлів та компонентів, що підлягають контролю.

У роботі [11] запропоновано методи діагностики, що передбачають використання вібраційних датчиків на валах редуктора. Такі датчики є порівняно недорогими та надійними пристроями, що робить їх перспективними для застосування у системах діагностики вітрогенераторів. У роботі [12] представлена структура та конфігурація датчиків, однак відсутній докладний опис їх характеристик та обґрунтування вибору місць встановлення. У зв'язку з цим важливим завданням є визначення оптимальної кількості датчиків та їх розташування у редукторі. Відповідно до стандарту ISO 2373, вимірювання слід проводити в точках з максимальною жорсткістю конструкції і найкоротшим шляхом передачі сигналу.



Рисунок 1.15 - Компоненти вітрогенератора

Вібраційний аналіз є одним із найбільш поширених та затребуваних методів діагностики механічних систем [13]. Генератор у складі вітрогенератора виступає ключовим елементом, що забезпечує перетворення кінетичної енергії вітру на електричну. Згідно зі статистичними даними [14], близько 40% відмов асинхронних машин пов'язані з ушкодженнями підшипників. Існує кілька підходів до діагностики їхнього стану. Одним з них є аналіз спектрів вібраційних сигналів [15], який набув широкого поширення і дозволяє виявляти різні види дефектів підшипників. Однак його недоліками є відносно низька чутливість та необхідність використання складних вимірювальних пристроїв [14]. Іншим методом є температурний контроль підшипників, при якому підвищення температури свідчить про проблеми монтажу або нестачу мастила [16]. Таким чином, потрібний обґрунтований вибір методу діагностики стану підшипників.

Акселерометри застосовуються для вимірювання прискорень і частоти

обертання і можуть використовуватися для контролю роботи елементів, що обертаються, наприклад, вихідного валу генератора. В рамках роботи необхідно вибрати тип датчика і інтегрувати його в систему діагностики вузлів вітрогенератора, що обертаються.

Одним із найефективніших підходів до моніторингу стану вітрогенераторів є встановлення датчиків на основні вузли з наступним поєднанням їх у єдину мережу на основі технологій інтернету речей. У зв'язку з цим необхідно визначити перелік контрольованих компонентів та вибрати відповідні датчики. Одним із ключових елементів є редуктор, де основною причиною відмов є пошкодження підшипників [18]. Наприклад, вихід з ладу заднього підшипника високошвидкісного валу призводить до зміни його положення, нерівномірної передачі навантаження та руйнування зубчастих зачеплень. Для контролю стану підшипників застосовуються вібраційні датчики, здатні фіксувати малі амплітуди коливань та виявляти дефекти на ранніх стадіях [17]. В якості альтернативи може використовуватися акселерометр ADXL1001, призначений для вимірювання вібраційних прискорень, який був обраний для моніторингу редуктора.

Важливим параметром є також контроль цілісності конструкції, оскільки вітрогенератори встановлюються на значній висоті, а їх гондола і лопаті мають велику масу, зосереджену у верхній частині. Як вимірювальні засоби можуть застосовуватися лазерні датчики [48], що відрізняються високою точністю і надійністю, проте їх недоліком є висока вартість. Більш доступним рішенням є використання ємнісних датчиків, які працюють на принципі зміни ємності при зміні відстані між металевими поверхнями. Як такий датчик був обраний датчик Холла.

Ще одним важливим параметром є температура обмоток генератора. Для контролю можуть застосовуватися різні типи датчиків. Перший варіант -

термістори, що є резистивними елементами із залежністю опору від температури. Вони характеризуються високою чутливістю, швидкодією і невисокою вартістю, проте мають обмежену точність [19]. Другий варіант - термоопори, виготовлені з рідкісних металів, що відрізняються високою точністю, швидкодією і широким діапазоном вимірювань (від -200 до 600 °C), але мають високу вартість [20]. Третій варіант — термопари, засновані на ефект термо -ЕРС, які можуть працювати в широкому температурному діапазоні (від -200 до 2000 °C), проте також відрізняються високою вартістю.

У результаті контролю температури обмоток був обраний термістор, як найбільш економічно доцільне рішення з достатнім діапазоном вимірювань. Таким чином, визначено основні вузли вітрогенератора, що підлягають моніторингу. Перед впровадженням системи необхідно провести лабораторні випробування вибраних датчиків з використанням відповідних вимірювальних засобів та випробувальних установок.

Прогноз вихідної потужності вітрогенератора

Одним із ключових факторів, що визначають ефективність роботи вертикально-осьових вітрогенераторів, є швидкість вітру [21]. Управління положенням лопатей, зокрема зміна кута атаки залежно від вітрових умов, відіграє у забезпеченні максимального використання енергії потоку. Прогнозування швидкості вітру є важливим елементом даного процесу, оскільки дозволяє заздалегідь адаптувати положення лопатей підвищення ефективності генерації. Точні прогнози дають можливість оптимізувати режим роботи установки, збільшити її продуктивність та підвищити енергетичну віддачу.

Використання прогнозних даних дозволяє операторам заздалегідь коригувати параметри вітрогенератора [22]. Наприклад, при очікуваному збільшенні швидкості вітру можливо збільшити кут атаки лопатей для максимального вилучення енергії, тоді як при зниженні швидкості вітру доцільно

зменшити кут атаки зниження опору і запобігання надлишкових навантажень. Це сприяє підвищенню надійності обладнання, збільшенню терміну служби та зниженню експлуатаційних витрат. Крім того, ефективне управління на основі прогнозування сприяє більш раціональному використанню вітрової енергії та зниженню залежності від традиційних джерел палива.

Аналіз літературних джерел показує, що завдання прогнозування швидкості вітру та вихідної потужності вітрогенераторів, як правило, розглядаються окремо. У роботі [23] представлена система управління вихідною потужністю, тоді як у [14] розроблена лінійна модель прогнозування швидкості та напрямки вітру на основі часових рядів. У дослідженні [25] застосовано метод нечіткої логіки для короткострокового прогнозу потужності та швидкості вітру. У роботі [26] запропоновано статистичний метод прогнозування швидкості вітру із використанням штучного інтелекту на інтервал до 48 годин. У [27] розглянуто підхід із застосуванням нейронних мереж та ентропійних методів для погодинного прогнозування потужності, а в [8] розроблено рекурентну нейронну мережу для аналізу усереднених даних. Також є рішення на основі нелінійних регуляторів для генераторів з подвійним живленням [9] та інтелектуальні алгоритми управління потужністю [3]. У ряді робіт [12-14] розглядаються методи підвищення ефективності за рахунок регулювання швидкості обертання та керування вітровим потоком.

Незважаючи на різноманітність підходів, більшість моделей мають загальний недолік — наявність затримок, пов'язаних із вимірюванням швидкості вітру та передачею зворотного зв'язку, що знижує точність прогнозування вихідної потужності.

Прогнозування швидкості вітру є одним із пріоритетних напрямків у галузі вітроенергетики, оскільки безпосередньо впливає на надійність енергосистем та управління генерацією [7]. Розрізняють довгострокові та

короткострокові прогнози: перші використовуються для планування розподілу енергії, другі – для оперативного управління установками [4]. В даний час розроблено безліч методів прогнозування, включаючи адаптивні нейро-нечіткі системи [8], статистичні моделі на основі аеродинамічних параметрів [16], а також методи із застосуванням фільтра Калмана для підвищення точності результатів [7].

Для підвищення ефективності роботи вітрогенераторів необхідно враховувати як прогноз вітру, а й прогноз споживання електроенергії. Це дозволяє оптимізувати процеси накопичення, розподілу та використання енергії. У роботі розглядається система прогнозування споживання вихідної потужності з урахуванням різних чинників. Для підвищення точності та швидкості обчислень використовується метод штучних нейронних мереж. Формування бази даних здійснюється на основі статистичних даних за попередні періоди, що дозволяє враховувати сезонні зміни, особливості днів тижня та добові коливання навантаження.

Таким чином, враховуються як метеорологічні умови, і тимчасові параметри, що впливають енергоспоживання. Прогнозування споживання залишається актуальним завданням як етапі проектування, і під час експлуатації вітрогенераторів [8]. Це дозволяє більш точно підбирати параметри енергетичних систем та оптимізувати режими їхньої роботи. Розроблена система може застосовуватися для різних типів вітрогенераторів [9] та сприяє вирішенню завдань розподілу енергії, планування ремонтів та вибору режимів експлуатації [20].

Для реалізації системи необхідно організувати збір статистичних даних щодо кожного об'єкта, а також забезпечити централізовану обробку інформації. Ключовим показником є якість прогнозу, від якого залежить надійність роботи системи та ефективність розподілу енергії [11]. Новизна роботи полягає у

розробці методу прогнозування з урахуванням метеоумов, сезонних факторів та тимчасових характеристик. При цьому зазначається, що найбільшу точність забезпечує короткострокове прогнозування, тоді як довгострокові прогнози схильні до більшої похибки через невизначеність кліматичних умов.

Метою даного розділу є вибір оптимального методу прогнозування вихідної потужності на основі аналізу історичних даних та факторів, що впливають. Для перевірки ефективності використовується модель штучної нейронної мережі, що дозволяє оцінити її реакцію зміну вхідних параметрів. Як приклад розглядається об'єкт із добовим споживанням до 9000 кВт·год . Для побудови моделі застосовується програмний пакет MATLAB Neural Network Toolbox .

На першому етапі розробки необхідно вибрати програмне середовище та визначити параметри моделі. В даний час існує безліч програмних рішень для побудови нейронних мереж, включаючи Statistica Automated Neural Networks [2], що дозволяє автоматично підбирати параметри та створювати програми для прогнозування [3]. Однак його використання потребує значних навичок.

У зв'язку з цим обрано програмний комплекс MATLAB з модулем Neural Network Toolbox [14], що надає зручні інструменти для створення та навчання нейронних мереж [15]. Його перевагою є наявність готових шаблонів, дозволяють адаптувати моделі під конкретні завдання [6], і навіть відносна простота освоєння.

Наступним етапом є вибір алгоритму навчання. Одним із найпоширеніших є алгоритм Левенберга – Марквардта , заснований на мінімізації середньоквадратичної помилки. Навчання продовжується до досягнення мінімального значення помилки. Проте дослідження [8] показали, що цей метод може поступатися іншим підходам за точністю.

Альтернативою є алгоритм Байєса навчання, який забезпечує більш високу точність, але вимагає більшого часу на навчання [19-20]. В результаті

необхідно сформувати нейронну мережу, здатну ефективно підбирати вагові коефіцієнти з метою мінімізації середньоквадратичної помилки прогнозування. Вибрана модель штучної нейронної мережі була побудована у програмному середовищі Matlab у додатку Neural Network Toolbox (рисунок 1.16).

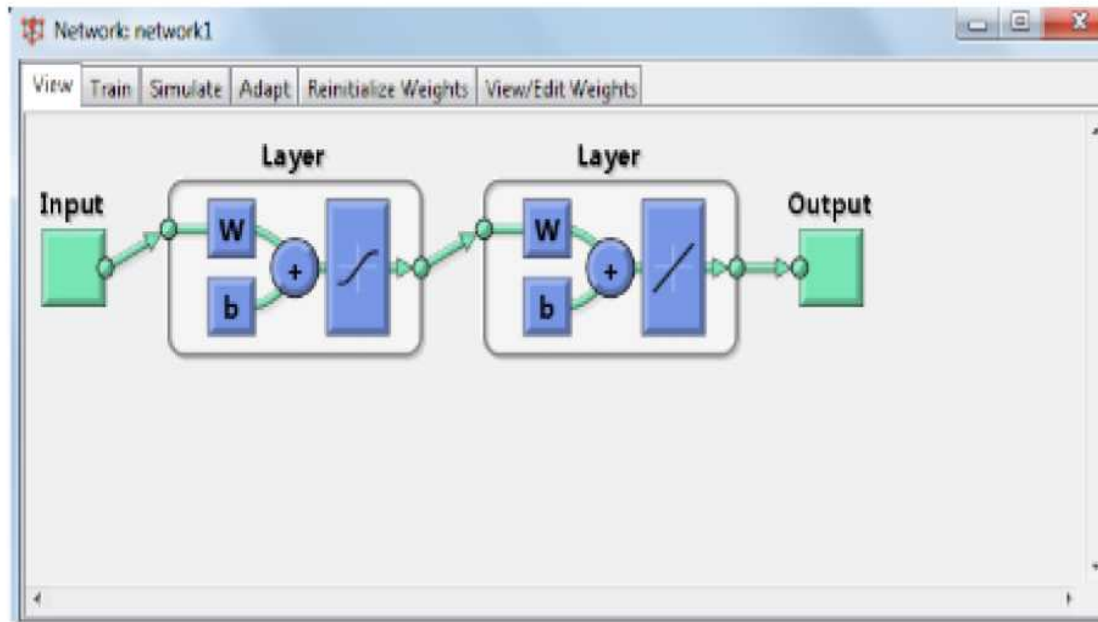


Рисунок 1.16 - Загальна схема штучної нейронної мережі прямого поширення даних та зворотного поширення помилки

На основі штучної нейронної мережі, показаної на рисунку 1.16, розроблятиметься штучна нейронна мережа для прогнозу споживання вихідної потужності вітрогенератора [1]. Для підвищення точності роботи штучної нейронної мережі необхідно модернізувати схему, показану на рисунку 1.16, так щоб вхідні дані оброблялися мережею з урахуванням вагових коефіцієнтів, потім мережі зворотного зв'язку знову приходили на вхід, це дозволить змінити помилку зворотного поширення. Доопрацьована схема штучної нейронної мережі показано на рисунку 1.17.

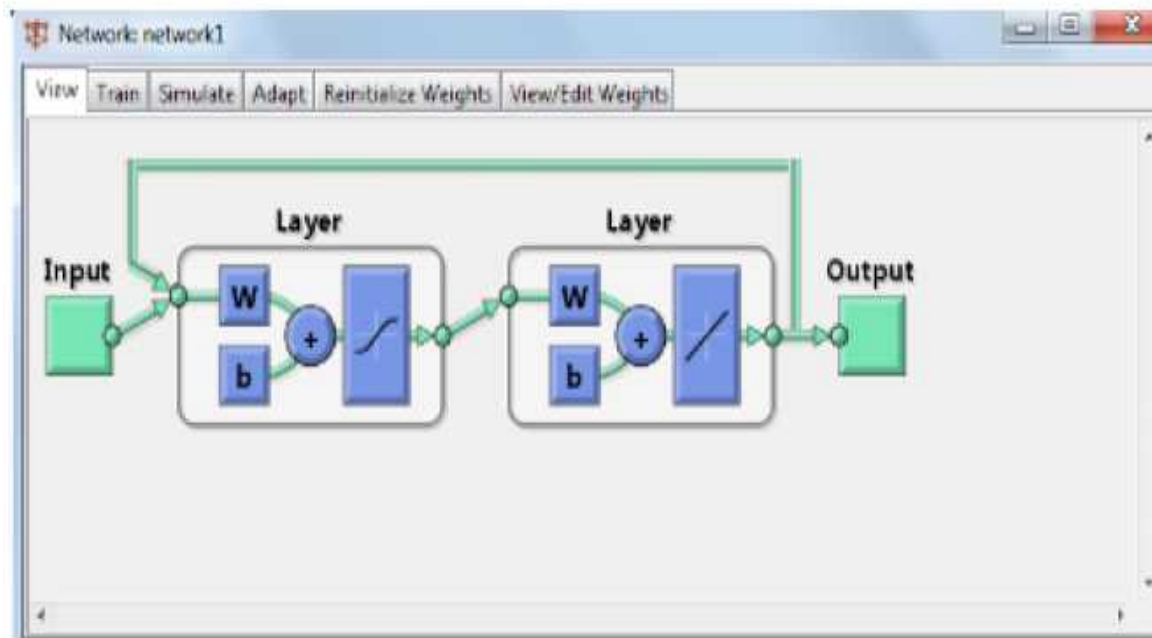


Рисунок 1.17 - Доопрацьована схема штучної нейронної мережі із зворотним зв'язком

1.4 Висновки до Глави1

Таким чином, два ключові взаємопов'язані чинники — зростання чисельності населення та рівень енергоємності ВВП — істотно впливають на перспективи енергоспоживання та виробництва електроенергії як у світі, так і в Україні. Аналіз поданих у цьому розділі даних показує стійку тенденцію збільшення попиту енергоресурси. У зв'язку з цим одним із основних завдань енергетичного сектора є нарощування обсягів виробництва електроенергії відповідно до зростаючих потреб.

За прогнозами фахівців, значна частина енергетичного балансу, як і раніше, базуватиметься на вуглеводневих ресурсах. Однак нестабільність цін на енергоносії, геополітичні фактори та погіршення екологічної ситуації зумовлюють необхідність розширення використання відновлюваних джерел енергії та розвитку атомної енергетики. Це сприяє посиленню інтересу до

альтернативних джерел енергії, які у перспективі здатні частково замінити традиційні вуглеводневі ресурси.

Україна має значний потенціал у галузі відновлюваної енергетики, включаючи вітрову, сонячну, геотермальну енергію, а також ресурси малих річок. Зростання споживання енергії та посилення екологічних вимог вимагають активного розвитку таких напрямів, як будівництво малих гідроелектростанцій та вітрових електростанцій. У той же час впровадження відновлюваних джерел енергії потребує комплексного аналізу з урахуванням технічних та економічних факторів.

Як правило, вітрогенератори розміщуються у віддалених районах – на морських узбережжях, у гірській або горбистій місцевості, де забезпечуються найбільш сприятливі вітрові умови. У таких умовах виникає необхідність застосування складних конструкцій, що включають множину електромеханічних систем, що потребують постійного контролю. Ці системи відіграють важливу роль у забезпеченні надійної та ефективної роботи вітрогенераторів.

Контролер, який є центральним елементом управління, координує роботу всіх вузлів установки. Без системи контролю ефективна експлуатація вітрогенератора неможлива, тому об'єднання контролерів окремих установок у єдину систему дистанційного моніторингу є необхідною умовою їхньої надійної та стабільної роботи. Для досягнення поставленої мети було виділено такі завдання: розглянути блоки управління вітрогенераторами, створити систему діагностики основних компонентів вітрогенератора з можливістю дистанційної передачі даних через інтернет та розробити систему прогнозування швидкості вітру для попереднього налаштування параметрів вітрогенератора.

Глава 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРАМИ

Метою цього розділу є створення математичних моделей компонентів системи керування вітрогенераторів. В даний час цифрові системи управління набувають все більшого поширення. Активно розвиваються методи математичного та чисельного моделювання, удосконалюються апаратні засоби обчислювальної техніки та програмне забезпечення. Використання математичного моделювання на етапі проектування дозволяє скоротити витрати, зменшити час розробки та знизити обсяг експериментальних досліджень системи управління. У цьому розділі представлений метод комп'ютерного моделювання, спрямований визначення математичних моделей компонентів блоку управління вітрогенератора.

Для проведення математичних розрахунків та аналізу компонентів системи управління було обрано середовище MATLAB/ Simulink (компанія Mathworks Inc). Цей програмний продукт складається з двох модулів: перший модуль призначений для виконання складних математичних операцій з числами, векторами, матрицями та рівняннями різного рівня складності; другий модуль містить набір готових бібліотек для моделювання пристроїв та систем керування.

Вітрогенератор включає такі основні компоненти [2]: вітроколесо, електричний генератор, контролер заряду АКБ, інвертор та акумуляторну батарею (АКБ). Вітроколесо перетворює енергію вітру на обертальну механічну енергію. Воно складається з лопатей, які приймають потік вітру, перетворюють його на обертальний рух і передають його на вал генератора. Електричний генератор перетворює механічну енергію ротора вітроколеса на електричну [3]. Для ВЕУ можуть використовуватися різні типи генераторів - асинхронні, синхронні, постійного струму та ін, вибір яких визначається умовами експлуатації,

необхідної потужністю та якістю електричної енергії.

Контролер заряду АКБ призначений для підтримки оптимальних значень струму та напруги при зарядці акумулятора [14], забезпечуючи безпечний та ефективний процес заряду. Інвертор перетворює постійну напругу в змінну, розрізняють інвертори з чистою синусоїдою та модифікованою синусоїдою. Інвертори з чистою синусоїдою забезпечують високу якість змінного струму, але мають велику вартість і застосовуються для навантаження, чутливого до якості енергії. Для індуктивних навантажень (електродвигуни, трансформатори) зазвичай використовують інвертори з модифікованою синусоїдою [5]. АКБ служать накопичення електричної енергії; найчастіше застосовуються свинцево-кислотні батареї, які витримують глибокий розряд та мають великий ресурс циклів заряд/розряд.

Під час створення математичної моделі вітрогенератора важливо визначити граничні умови моделі. Ключовим параметром, що впливає ефективність роботи установки, є коефіцієнт використання енергії вітру, що позначається в літературі як C_p - відношення механічної енергії ротора до повної потужності вітрового потоку. Математична модель вітрогенератора розробляється із заданим значенням K . Загальна схема вітрогенератора показана на рисунку 2.1



Рисунок 2.1 – Загальна функціональна схема вітрогенератора з використанням блоку управління

Функціональна схема вітрогенератора з впровадженням блоком управління забезпечує роботу вітрогенератора за алгоритмом, що задає, в блоці управління, описаних у розділі 1.2. Дана модель дозволяє провести порівняльний аналіз методів управління з метою вибору оптимального режиму та розробки моделі управління.

2.1 Математична модель вітрового потоку

Для початку необхідно розробити комп'ютерну модель вітрогенератора, на яку буде задаватися різне значення швидкості вітру за часом. Залежно від параметрів вітрового потоку здійснюється вибір системи керування та вимоги до вітроустановки [8]. Таким чином, необхідно розробити модель вітрового потоку із завданням горизонтальної швидкості вітрового потоку $V(T)$, яка визначається як сума середньої швидкості вітру $V^{\wedge}$ і динамічної швидкості вітрового потоку V_g :

$$V(T) = V_{cp} + V_g \quad (2.1)$$

Використовуючи ряд Фур'є, було виведено горизонтальну швидкість вітру:

$$V(T) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k * \cos(\omega_k T + \varphi_k) \quad (2.2)$$

де, A_k - Амплітуда гармонік значень швидкості вітру;

A_0 – ймовірність.

ω_k - кругова частота k-тої гармоніки ;

φ_k - фазовий зсув коливань.

Для визначення динамічної швидкості вітрового потоку використовують модель Каймалу спектральної щільності $f(S)$ [9]:

$$\frac{f \cdot f(S)}{\partial^2} = \frac{4 \cdot f \cdot \frac{n}{V_{cp}}}{1 + 6 \cdot f \cdot \left(\left[\frac{n}{V_{cp}} \right] \right)^{1,6}} \quad (2.3)$$

де, f - Частота сигналу гармонійної швидкості вітру, Гц;

$f(S)$ - спектральна складова швидкості вітру по осі x ;

n - коефіцієнт турбулентності;

Амплітуда гармонік значень швидкості вітру в рівнянні 2.2 обчислюється як середньоквадратичне відхилення [10]:

$$A_k = \sqrt{f(S_k)} \cdot \Delta f \quad (2.4)$$

Таким чином, після підстановки в рівняння 2.1 отримані значення рівнянь 2.2, 2.3 і 2.4, була отримана швидкість вітру по осі x :

$$V(T) = V_{cp} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{f(S_k)} \cdot \Delta f \cdot [\cos(\omega)_k T + \varphi_k] \quad (2.5)$$

2.2 Прогноз вихідної потужності вітрогенератора

У цьому розділі розглядається метод розрахунку прогнозованої вихідної потужності вітрогенератора на основі фактичних та прогнозованих даних про швидкість вітру, отриманих з Інтернету, із застосуванням методу експоненційного згладжування для мінімізації помилок прогнозування. Також представлений спосіб зберігання цих даних та відображення результатів прогнозування на екрані для зручності користувача.

Одним із ключових факторів роботи вітрогенераторів є ефективне використання енергії вітру для вироблення електроенергії [1]. Короткостроковий прогноз швидкості вітру є прогнозом значень швидкості вітру на найближчі

кілька годин або днів. Він є важливим інструментом для управління вітрогенераторами, тому що дозволяє планувати, коли і в якому обсязі очікується вироблення енергії. Для максимізації вихідної потужності вітрогенератора необхідно оптимізувати роботу з урахуванням прогнозованої швидкості вітру. У цьому процесі є критично важливими як фактичні, так і прогнозовані дані про вітровий потік.

Існує безліч онлайн-ресурсів, що надають інформацію про швидкість вітру в реальному часі та прогнози на кілька днів уперед. Використовуючи ці дані, можна побудувати модель, яка дозволяє оцінювати прогнозовану вихідну потужність вітрогенератора. При цьому важливо враховувати, що швидкість вітру є змінною величиною, здатною змінюватися в широкому діапазоні, і точна оцінка потужності за різних значень швидкості вітру є необхідною умовою ефективного використання вітроенергії.

Мета цього розділу - об'єднати методи короткострокового прогнозу швидкості вітру та оцінити їх ефективність для розрахунку вихідної потужності вітрогенератора. Для цього визначається залежність потужності генератора від швидкості вітру та аналізується вплив змін швидкості вітру на його вихідну потужність. Цей параметр можна визначити за допомогою наступної формули:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3, \quad (2.6)$$

де, P – вихідна потужність вітрогенератора;

ρ - щільність повітря;

A – площа поперечного перерізу лопатей ротора;

C_p - Коефіцієнт потужності;

V – швидкість вітру.

Коефіцієнт потужності вітрогенератора може змінюватись в залежності від

швидкості вітру, що призводить до зміни ефективності використання вітру. Це з тим, що з різних швидкостях вітру лопаті вітрогенератора можуть у різних положеннях. Для визначення оптимальної швидкості вітру для максимальної вихідної потужності вітрогенератора необхідно використовувати криву потужності, для прикладу було взято вітрогенератор номінальної потужності 300кВт [12]. Така крива показує залежність вихідної потужності від швидкості вітру (таблиця 2.1)

Таблиця 2.1 – Залежність вихідної потужності від швидкості вітру

Швидкість вітру (м/с)	Вихідна потужність (кВт)
3	0
4	0
5	3
6	12
7	30
8	54
9	84
10	120
11	162
12	210
13	252
14	282
15	300
16	306
17	300
18	282
19	252
20	210

Як випливає з таблиці 2.1, максимальна вихідна потужність вітрогенератора досягається за швидкості вітру близько 16 м/с. При подальшому збільшенні швидкості вітру потужність починає знижуватися через роботу вбудованої системи захисту від перевантажень. Отже, для ефективної роботи

вітрогенератора необхідно враховувати поточну швидкість вітру та задавати оптимальні параметри роботи. У цьому допомагають короткострокові прогнози швидкості вітру, що дозволяють прогнозувати зміни погодних умов на найближчий час. На основі цих даних можна розраховувати вихідну потужність вітрогенератора та коригувати його роботу в режимі реального часу.

Для побудови формули прогнозу швидкості вітру було обрано метод найменших квадратів, який мінімізує суму квадратів відхилень між прогнозованими та фактичними значеннями. Результатом застосування цього методу є визначення оптимального коефіцієнта згладжування, що обчислюється через мінімізацію середньоквадратичної помилки .

Для розрахунку коефіцієнта згладжування був використаний метод найменших квадратів. Для цього використовується наступне рівняння:

$$\alpha = \frac{2}{n+1} \quad (2.7)$$

де, n – кількість спостережень (годин у даному випадку).

Для розрахунку були взяті наступні параметри вітрогенератора: щільність повітря дорівнює 1.225 кг/м³ площа поверхні вітрогенератора дорівнює 10 м² а коефіцієнт потужності вітрогенератора дорівнює 0.35.

Для розрахунку прогнозованої вихідної потужності обраного вітрогенератора для міста Алмати було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматично в режимі реального часу отримувати дані з сайту www.accuweather.com про поточне та прогнозоване значення швидкості вітру, а також відповідно до формули 1 проводиться розрахунок вихідної потужності вітрогенератора на основі прогнозованого значення. Далі наведено програмний код, а блок-схема мовою Python.

```
import requests
```

```

from bs4 import BeautifulSoup
from datetime import datetime

# Link to weather page in Almaty
url"          https://www.accuweather.com/ru/kz/almaty/51076/hourly-weather-
forecast/51076 "

# Headers for the request
headers = {
    'User-Agent':    'Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64)
AppleWebKit /537.36 (KHTML, як Gecko) Chrome/58.0.3029.110 Safari/537.3'}

# Send a GET request to the page
response = requests.get ( url , headers=headers)

# Create a BeautifulSoup object for parsing the page
soup = BeautifulSoup ( response.content , ' html.parser ')

# Find the table with weather data
table = soup.find _all ('table')[0]

# Get the rows of the table
rows = table.find _all ('tr')

# Create a list to store the data
data = []

# Перейти до першого ряду (table header)
for row in rows [ 1:]:
    # Get the values of the cells y the current row
    cells = row.find _all ('td')

    # Get the date and time from the first cell
    date_time = datetime.strptime (cells[0].text, '% d.%m.%Y %H:%M')

    # Get the wind speed from the second cell
    wind_speed = float(cells[1]. text.split ()[0])

```

```

# Calculate the power of the wind generator
power = 0.5 * 1.225 * 10 ** 2 * 0.35 * ( wind_speed ** 3)
# Add the data to the list
data.append ([ date_time , wind_speed , power])
# Create a table as a dictionary
table = {'Date and time': [], 'Wind speed (m/s)': [], 'Power (W)': []}
# Add the data to the table
for row in data:
    table[ 'Date and time'].append(row[0])
    table[ 'Wind speed (m/s)'].append(row[1])
    table[ 'Power (W)'].append(row[2])
# Add the current value and the forecast value of the wind speed
table[ 'Current wind speed (m/s)'] = table[ 'Wind speed (m/s)'][-1]
table[ 'Forecast wind speed (m/s)'] = table[ 'Wind speed (m/s)'][-1]
# Print the table
print ( table )

```

Результат виведення представлений як бази даних рисунку 2.2 й у таблиці 2.2. Завдяки представленому програмному забезпеченню дані про фактичне та прогнозоване значення швидкості вітру в режимі реального часу автоматично надходять до бази даних, а також на їх основі розраховується прогнозована вихідна потужність вітрогенератора.

```

1 1 Date 1 Time 1 Wind Speed (m/s) 1 Predicted Wind Speed (m/s) 1 1 Power Output (W)
1 1 1 1 2023-05-01 | 01:00 1 4.8 1 4.2 | 1074.24 |
1 2 1 1 2023-05-01 | 02:00 1 5.3 1 5.4 | 2145.30 |
1 3 1 1 2023-05-01 | 03:00 1 4.2 1 4.2 | 326.59 |
1 4 1 1 2023-05-01 | 04:00 1 4.8 1 4.8 | 1074.24 |
1 5 1 1 2023-05-01 | 05:00 1 5.5 1 5.4 | 1662.02 |
1 6 1 1 2023-05-01 | 06:00 1 4.2 1 4.2 | 326.59 |
1 7 1 1 2023-05-01 | 07:00 1 4.8 1 4.8 | 1074.24 |
1 8 1 1 2023-05-01 | 08:00 1 5.4 1 5.4 | 1662.02 |
1 9 1 1 2023-05-01 | 09:00 1 6.3 1 6.3 | 2569.70 |

```

Рисунок 2.2 – Результат виконання програми

Таблиця 2.2 – Розрахунок вихідної потужності

Годи на	Дата	Фактична швидкість вітру (м/с)	Прогнозована швидкість вітру (м/с)	Вихідна потужність (W)
1	23/05/01	4.6	4.2	542.28
2	23/05/01	4.8	4.8	1074.24
3	23/05/01	5.3	5.4	2145.30
4	23/05/01	4.2	4.2	326.59
5	23/05/01	4.8	4.8	1074.24
6	23/05/01	5.5	5.4	1662.02
7	23/05/01	4.2	4.2	326.59
8	23/05/01	4.8	4.8	1074.24
9	23/05/01	5.4	5.4	1662.02
10	23/05/01	6.3	6.3	2569.70

Для підвищення точності прогнозу було вирішено використати метод експоненційного згладжування для обробки даних, отриманих програмно на рисунку 2.3. Відповідно до формули 2.7 коефіцієнта згладжування дорівнюватиме

$$\alpha = \frac{2}{10+1} = 0,1818 \quad (2.8)$$

Далі була використана формула для експонентного згладжування, щоб

отримати прогноз швидкості вітру для наступної години:

$$S_{t+1} = \alpha V_t + (1 - \alpha) \cdot S_t \quad (2.9)$$

де, S_{t+1} - прогноз швидкості вітру наступної години;

V_t - фактична швидкість вітру в поточний час;

S_t – прогноз швидкості вітру на попередню годину.

Для початкового прогнозу використано перше значення фактичної швидкості вітру. Відповідно до таблиці 2.2 $S_1 = 4.6$ м/с, тоді прогноз швидкості вітру наступної години буде:

$$S_2 = 0.1818 \cdot 4.6 + (1 - 0.1818) \cdot 4.6 = 4.6 \text{ m/s}$$

Аналогічно, були розраховані прогнозовані значення з урахуванням коригування для решти годин послідовно застосовуючи цю формулу, використовуючи попередній прогноз та фактичні дані за поточну годину:

$$S_3 = 0.1818 \cdot 4.8 + 0.8182 \cdot 4.6 = 4.8 \text{ m/s}$$

$$S_4 = 0.1818 \cdot 5.3 + 0.8182 \cdot 4.8 = 5.38 \text{ m/s}$$

$$S_5 = 0.1818 \cdot 4.2 + 0.8182 \cdot 5.38 = 4.2 \text{ m/s}$$

$$S_6 = 0.1818 \cdot 4.8 + 0.8182 \cdot 4.2 = 4.8 \text{ m/s}$$

$$S_7 = 0.1818 \cdot 5.5 + 0.8182 \cdot 4.8 = 5.42 \text{ m/s}$$

$$S_8 = 0.1818 \cdot 4.2 + 0.8182 \cdot 5.42 = 4.2 \text{ m/s}$$

$$S_9 = 0.1818 \cdot 4.8 + 0.8182 \cdot 4.2 = 4.8 \text{ m/s}$$

$$S_{10} = 0.1818 \cdot 5.4 + 0.8182 \cdot 4.8 = 5.4 \text{ m/s}$$

$$S_{11} = 0.1818 \cdot 6.3 + 0.8182 \cdot 5.4 = 6.3 \text{ m/s}$$

Таким чином, після застосування методу експоненційного згладжування з даними, отриманими з сайту accuweather.com, була складена таблиця 2.3, де була розрахована вихідна потужність вітрогенератора за даними швидкості вітру.

Таблиця 2.3 - Порівняння даних прогнозу, отриманих із сайту та даних після обробки з фактичними значеннями

Година	Фактична швидкість вітру (м/с)	Прогноз швидкості вітру за даними сайту (м/с)	Прогнозована швидкість вітру після розрахунку (м/с)	Потужність за фактичною швидкістю вітру (Вт)	Потужність за швидкістю вітру по сайту (Вт)	Потужність за швидкістю вітру з розрахунку (Вт)
1	4.6	4.2	4.6	208663.8	158825.0	208663.8356
2	4.8	4.8	4.8	237081.6	237081.6	237081.6
3	5.3	5.4	5.38	326036.5 063	337562.3	326036.5063
4	4.2	4.2	4.2	158825.0	158825.0	158825.0781
5	4.8	4.8	4.8	237081.6	237081.6	237081.6
6	5.5	5.4	5.42	356665.9	337562.3	357030.8438
7	4.2	4.2	4.2	158825.0	158825.0	158825.0781
8	4.8	4.8	4.8	237081.6	237081.6	237081.6
9	5.4	5.4	5.4	337562.3	337562.3	337562.3781
10	6.3	6.3	6.3	540282.0	540282.0238	540282.0238

Для оцінки помилки прогнозування був використаний метод MAE (Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_k| \quad (2.10)$$

де, y_i - Фактичне значення цільової змінної;

y_k - прогнозне значення цільової змінної;

n – кількість спостережень.

За формулою 2.10 були розраховані помилки прогнозування для потужностей за даними швидкості вітру з сайту і за даними після розрахунку за методом експоненційного згладжування. Результати обчислень занесено до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Порівняння помилки прогнозу отриманих із сайту та даних після обробки

Потужність за фактичною швидкістю вітру	Потужність за швидкістю вітру по сайту (Вт)	Потужність за швидкістю вітру з розрахунку	MAE до обробки розрахунками	MAE після розрахунку (%)
208663.8356	158825.0781	208663.8356	9.5238	0
237081.6	237081.6	237081.6	0	0
326036.5063	337562.3781	326036.5063	1.8519	0.3704
158825.0781	158825.0781	158825.0781	0	0
237081.6	237081.6	237081.6	0	0
356665.9775	337562.3781	357030.8438	1.8519	0.8475
158825.0781	158825.0781	158825.0781	0	0
237081.6	237081.6	237081.6	0	0
337562.3781	337562.3781	337562.3781	0	0
540282.0238	540282.0238	540282.0238	0	0

2.3 Розробка математичної моделі блоку управління системою 6-лопатевого вітрогенератора

2.3.1 Загальна система керування лопатями вітрогенератора

Питання безпеки експлуатації вітрогенераторів можна вирішити з допомогою застосування гальмівної важільної системи [14]. На рисунку 2.3 показано 3D-модель такої системи керування лопатями вітроустановки. Для автоматизації регулювання положення лопат ротора використовується кроковий двигун у поєднанні із зубчастою передачею.

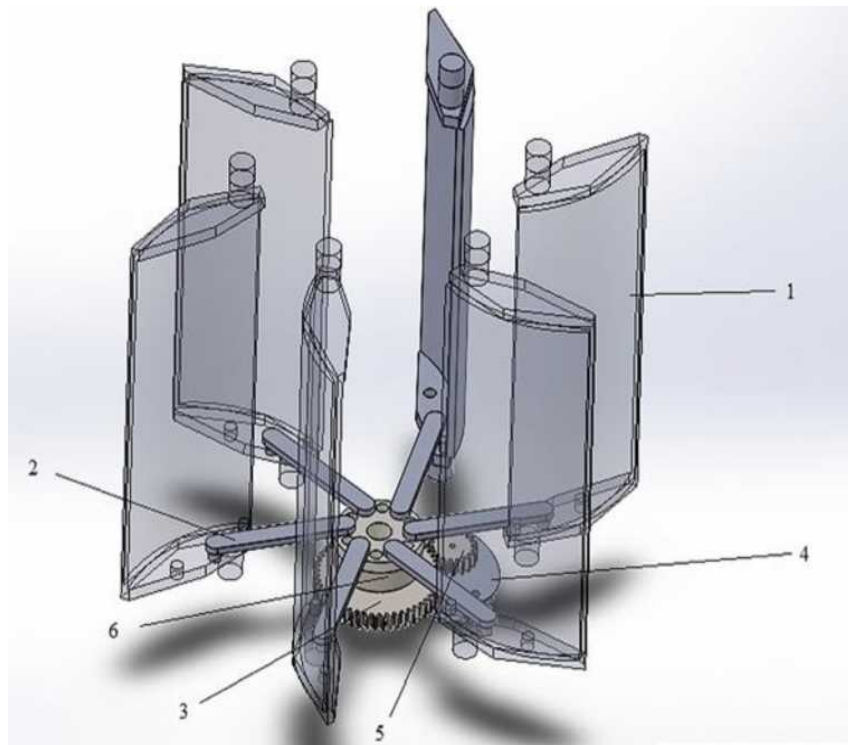


Рисунок 2.3 - Важільна система управління: 1-лопатя, 2 - важіль, 3 -зубчасте колесо велике, 4 - кроковий двигун, 5 - мала шестерня, 6 – диск

Завдяки цьому важільна гальмівна система може контролювати положення всіх лопатей за допомогою лише одного двигуна. Контролер розташований під нижньою основою, що створює додатковий захист пристрою керування від зовнішніх впливів.

Цей механізм призначений для точного керування лопатями вітрогенератора (1). Він включає систему важелів (2), змонтовану рухомому диску (6). Основним елементом системи є двигун (4), що забезпечує обертання. Працюючи двигуна приводиться у дію передавальний механізм (3, 5), який викликає обертання диска. Це обертання диска, своєю чергою, змінює положення лопатей. Використання комбінації важелів та двигуна-приводу дозволяє забезпечити точне керування лопатями, що дуже важливо для оптимізації роботи вітрогенератора та ефективного перетворення енергії вітру.

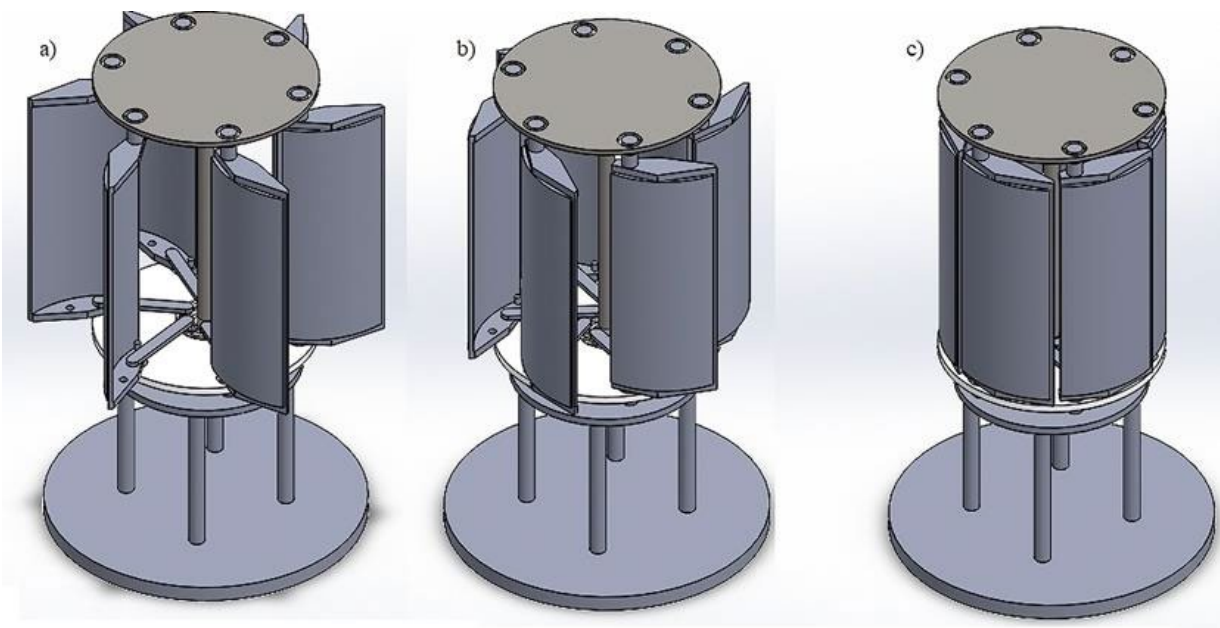


Рисунок 2.4 -Режими управління положенням лопатей вітрогенератора:

а) – нормальний режим роботи вітрогенератора, у якому система управління не активована; б) - регулювання положення лопат при швидкості вітру вище 25 м / с; в) – аварійний режим, за якого вітрогенератор не виробляє електроенергію

Регулювання кута нахилу лопатей дозволяє максимально використовувати вітровий потенціал у різних умовах експлуатації. Зовнішній вигляд вітрогенератора у кількох режимах роботи показаний на рисунку 2.4.

2.3.2 Побудова динамічної моделі управління положенням лопатей

Для побудови динамічної моделі механізму насамперед необхідно описати динаміку руху зубчастої передачі, яка дозволяє розраховувати кути, кутові швидкості та прискорення зубчастих коліс залежно від зовнішніх сил, параметрів системи та початкових умов. На рис. 2.5 представлена схема зачеплення зубчастих коліс.

Узагальнені координати зміни кута зубів q_1 і q_2 які відповідають кутам φ_1 і φ_2 :

$$q_1 = \varphi_1, q_2 = \varphi_2, \quad (2.11)$$

Рівняння (2.32) є рівнянням руху та описує другий закон Ньютона для зубчастої передачі. Воно пов'язує зміну кінетичної енергії (dL/dq_1), дисипативні сили (dD/dq_1) із зовнішніми силами Q_1 , що діють на систему:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_1} \right) - \frac{dL}{dq_1} + \frac{dD}{dq_1} = Q_1, \quad (2.12)$$

Далі було визначено залежність моменту інерції J_1 від кутової швидкості ω_1 :

$$\frac{dL}{d\varphi'_1} = J_1 \varphi'_1, \quad (2.13)$$

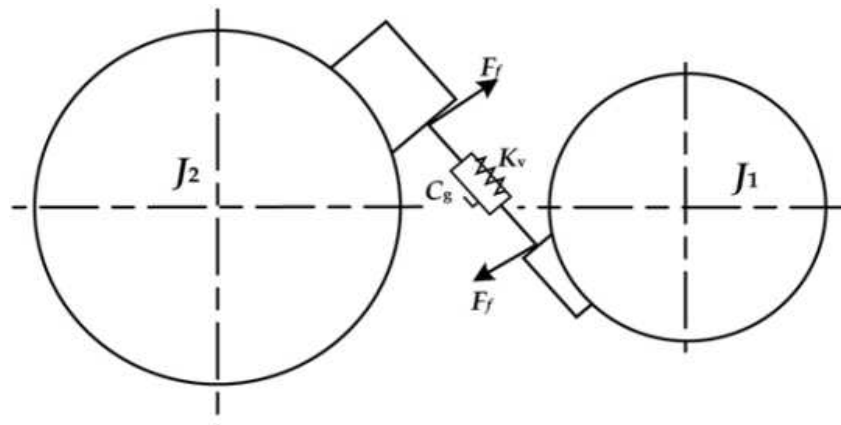


Рисунок 2.5 - зубчатая передача:

K_v — динамический коэффициент, J_1, J_2 — момент инерции, C_g — коэффициент эластичности

Далі було визначено залежність моменту інерції J_1 від кутової швидкості ω_1

:

$$\frac{dL}{d\varphi'_1} = J_1 \varphi'_1 \quad (2.14)$$

З рівняння 2.14 було взято похідну за часом та визначено кутове прискорення φ''_1 :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\varphi'_1} \right) = J_1 \varphi''_1 \quad (2.15)$$

У рівняннях (2.14) та (2.15) наводиться опис компонентів, пов'язаних з кінетичною енергією для першого зубчастого колеса.

$$\frac{dL}{d\varphi_1} = -k_{g1-2}(t) * (r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2) * r_{b1} - \frac{1}{2}(r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2)^2 * \frac{dk_{g1-2}(t)}{d\varphi_1}$$

$$\frac{dL}{d\varphi_1} = -k_{g1-2}(t) * (r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2) * r_{b1} \quad (2.16)$$

Рівняння 2. 16 визначає зв'язок енергії з дисипацією для першого зубчастого колеса:

$$\frac{dD}{d\varphi'_1} = C_{g1-2} * (r_{b1}\varphi'_1 - r_{b2}\varphi'_2) * r_{b1} \quad (2.17)$$

Рівняння 2.17 є виразом для моменту інерції J_1 , що залежить від зовнішніх сил і параметрів системи:

$$J_1 = T_1 - r_{f1} * [k_{g1-2}(t) * (r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2) + C_{g1-2} * (r_{b1}\varphi'_1 - r_{b2}\varphi'_2)] * \mu_{1-2} \quad (2.18)$$

Рівняння 2.18 є рівнянням руху для першого зубчастого колеса, що зв'язує момент інерції, кінетичну та дисипативну енергії, зовнішні сили та параметри системи:

$$\begin{aligned} J_1\varphi''_1 + k_{g1-2}(t) * (r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2) * r_{b1} + C_{g1-2} * (r_{b1}\varphi'_1 - r_{b2}\varphi'_2) * r_{b1} = \\ = T_1 - r_{f1} * [k_{g1-2}(t) * (r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2) + C_{g1-2} * (r_{b1}\varphi'_1 - r_{b2}\varphi'_2)] * \mu_{1-2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Рівняння 2.19, 2.18 та 2.17 відносяться до другого зубчастого колеса:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq'_2} \right) - \frac{dL}{dq_2} + \frac{dD}{dq'_2} = Q_2, \quad (2.20)$$

$$\frac{dL}{d\varphi'_2} = J_2\varphi'_2, \quad (2.21)$$

Рівняння 2.21 описує член, пов'язаний з кінетичною енергією для другого зубчастого колеса :

$$\frac{dL}{d\varphi_2} = k_{g1-2}(t) * (r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2) * r_{b1}, \quad (2.22)$$

Рівняння 2.22 визначає член, пов'язаний з дисипацією енергії другого зубчастого колеса:

$$\frac{dD}{d\varphi'_2} = C_{g1-2} * (r_{b1}\varphi'_1 - r_{b2}\varphi'_2) * r_{b1} \quad (2.23)$$

Рівняння (2.23) є виразом для зовнішніх сил Q_2 , що діють на друге зубчасте колесо:

Описана вище методика показує динаміку системи передачі з використанням шестерень. Змінні V_1 , V_2 , V_3 і V_4 являють собою кутові переміщення та швидкості шестерень, що беруть участь у передачі. Прийняли такі значення для параметрів системи:

- маса першого зубчастого колеса: $m_1 = 5$ кг;
- маса другого зубчастого колеса: $m_2 = 8$ кг;
- радіус першого зубчастого колеса: $r = 0.3$ м;
- радіус другого зубчастого колеса: $r_2 = 0.8$ м;
- коефіцієнт твердості: $k = 100$ Н/м;
- коефіцієнт дисипації: $C = 5$ Н-с/м;
- момент інерції першого зубчастого колеса: $J_1 = 2$ кг-м²;
- момент інерції другого зубчастого колеса: $J_2 = 1.5$ кг-м²;
- зовнішня сила Q_1 : $Q_1 = 50$ Н;
- зовнішня сила Q_2 : $Q_2 = 60$ Н;
- Коефіцієнт тертя: $\mu = 0.2$.

Для початку умовимося, що початкові значення для всіх змінних дорівнюють нулю:

$$V1(0) = 0$$

$$V2(0) = 0$$

$$V3(o) = 0$$

$$V4(0) = 0$$

Запропонована методика розрахунку була реалізована у вигляді програмного забезпечення мовою Python з урахуванням числових параметрів досліджуваної системи для виконання відповідних обчислювальних процедур. Фрагмент програмного коду наведено на рисунку 2.6, а блок-схему алгоритму розрахунку швидкості обертання зубчастої передачі подано у додатку Б.

Розроблений програмний код є основним засобом визначення швидкості обертання механізму передачі. Його функціонування ґрунтується на використанні раніше сформульованих математичних залежностей та алгоритмів, інтегрованих у структуру програми. Введення вхідних параметрів, зокрема швидкості вітрового потоку, передатного відношення та інших розрахункових величин, забезпечує можливість точного визначення швидкості обертання передачі в автоматизованому режимі.

На рисунку 2.7 представлено результати візуалізації роботи програмного забезпечення. Графічне відображення результатів розрахунків дозволяє наочно проаналізувати залежність швидкості обертання механізму передачі від зміни вхідних параметрів системи. Візуалізація може містити експериментальні точки, графічні криві та інші елементи подання даних, що підвищує інформативність аналізу та спрощує інтерпретацію отриманих результатів.

```

import numpy as np
def system_equations(t, V):
    V1, V2, V3, V4 = V
    m1 = 5
    m2 = 8
    r_b1 = 0.3
    r_b2 = 0.8
    k = 100
    C = 5
    J1 = 2
    J2 = 1.5
    T1 = 50
    T2 = 60
    mu = 0.2
    r_f1 = 1
    r_f2 = 1
    V1_dot = V2
    V2_dot = (T1 - r_f1 * (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V3) + C * (r_b1 *
V2 - r_b2 * V4))) * mu / J1 - (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V2) * r_b1 + C *
(r_b1 * V2 - r_b2 * V4) * r_b1) / J1
    V3_dot = V4
    V4_dot = (T2 - r_f2 * (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V3) + C * (r_b1 *
V2 - r_b2 * V4))) * mu / J2 - (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V3) * r_b1 + C *
(r_b1 * V2 - r_b2 * V4) * r_b1) / J2
    return [V1_dot, V2_dot, V3_dot, V4_dot]
V_initial = [0, 0, 0, 0]
t_start = 0
t_end = 10
dt = 0.01
t = np.arange(t_start, t_end, dt)
V_solution = np.zeros((len(t), 4))
V_solution[0] = V_initial
for i in range(len(t) - 1):
    k1 = dt * np.array(system_equations(t[i], V_solution[i]))
    k2 = dt * np.array(system_equations(t[i] + 0.5 * dt,
V_solution[i] + 0.5 * k1))
    k3 = dt * np.array(system_equations(t[i] + 0.5 * dt,
V_solution[i] + 0.5 * k2))
    k4 = dt * np.array(system_equations(t[i] + dt, V_solution[i] +
k3))
    V_solution[i + 1] = V_solution[i] + (1 / 6) * (k1 + 2 * k2 + 2 *
k3 + k4)
for i in range(len(t)):
    print(f"time: {t[i]}, Values: {V_solution[i]}")

```

Рисунок 2.6 - Программний код розрахунків швидкості обертання зубчастієї передачі

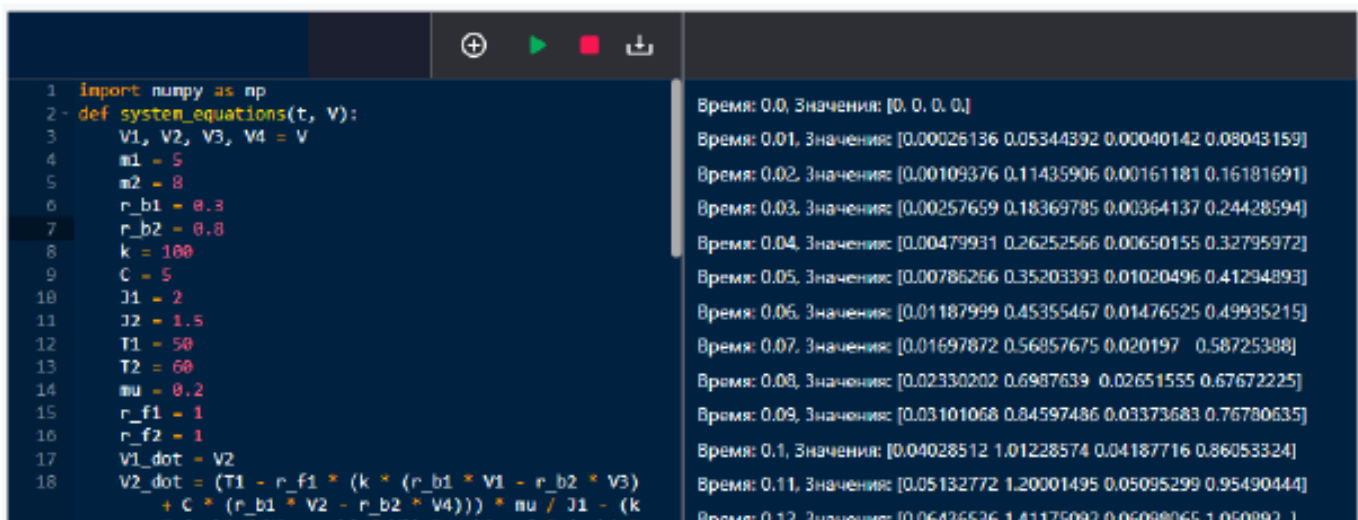


Рисунок 2.7 - Результат роботи програми

Відповідно до рисунка 2.7 енергія із зубчастої передачі передається на диск і далі за допомогою важеля відбувається управління положенням лопатей. Далі наведено повний програмний код розрахунку положення лопатей рисунку 2.8, а додатку 3 його блок-схема.

```
import numpy as np
import pandas as pd
def gear_system_equations(t, V):
    V1, V2, V3, V4 = V
    m1 = 10
    m2 = 8
    r_b1 = 1
    r_b2 = 0.8
    k = 100
    C = 5
    J1 = 2
    J2 = 1.5
    T1 = 50
    T2 = 60
    mu = 0.2
    r_f1 = 1
    r_f2 = 1
    V1_dot = V2
    V2_dot = (T1 - r_f1 * (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V3) + C * (r_b1 *
V2 - r_b2 * V4))) * mu / J1 - (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V2) * r_b1 + C *
(r_b1 * V2 - r_b2 * V4) * r_b1) / J1
    V3_dot = V4
    V4_dot = (T2 - r_f2 * (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V3) + C * (r_b1 *
V2 - r_b2 * V4))) * mu / J2 - (k * (r_b1 * V1 - r_b2 * V3) * r_b1 + C *
(r_b1 * V2 - r_b2 * V4) * r_b1) / J2
    return [V1_dot, V2_dot, V3_dot, V4_dot]
def lever_system_equations(t, theta):
    motor_torque = 10
    motor_ramp_time = 2
    lever_length = 1
    blade_length = 0.5
    lift_coefficient = 0.1
    if t < motor_ramp_time:
        motor_torque_current = motor_torque * t / motor_ramp_time
    else:
        motor_torque_current = motor_torque
    angular_acceleration = motor_torque_current / (blade_length *
lever_length)
    theta_dot = angular_acceleration * t
    return theta_dot
V_initial = [0, 0, 0, 0]
theta_initial = 0
t_start = 0
t_end = 10
dt = 0.01
t = np.arange(t_start, t_end, dt)
V_solution = np.zeros((len(t), 4))
V_solution[0] = V_initial
theta_solution = np.zeros_like(t)
theta_solution[0] = theta_initial
for i in range(len(t) - 1):
    k1 = dt * np.array(gear_system_equations(t[i], V_solution[i]))
    k2 = dt * np.array(gear_system_equations(t[i] + 0.5 * dt,
V_solution[i] + 0.5 * k1))
    k3 = dt * np.array(gear_system_equations(t[i] + 0.5 * dt,
V_solution[i] + 0.5 * k2))
    k4 = dt * np.array(gear_system_equations(t[i] + dt,
V_solution[i] + k3))
    V_solution[i + 1] = V_solution[i] + (1 / 6) * (k1 + 2 * k2 + 2 *
k3 + k4)
    theta_dot = lever_system_equations(t[i], theta_solution[i])
    theta_solution[i + 1] = theta_solution[i] + dt * theta_dot
R = 0.8
D = 0.5
V_disk = [(R / D) * V[1] for V in V_solution]
data = {'Time (sec)': t, 'V1': V_solution[:, 0], 'V2': V_solution[:,
1], 'V3': V_solution[:, 2], 'V4': V_solution[:, 3], 'V_disk': V_disk,
'Blade angle (rad)': theta_solution}
df = pd.DataFrame(data)
df['Blade angle (deg)'] = np.rad2deg(df['Blade angle (rad)'])
print(df)
```

Рисунок 2.8 - Програмний код розрахунку кута повороту лопат вертикально-осьового вітрогенератора в залежності від часу включення мотора

Після запуску даного програмного коду було отримано обчислення кутів повороту лопатей залежно від часу включення двигуна (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Результат виконання програми

	Час (сек)	Кут повороту лопаті (радий)	Кут повороту лопаті (град)
0	0.00	0.000000	0.000000
1	0.02	0.000040	0.002303
2	0.04	0.000322	0.018427
3	0.06	0.001085	0.062190
4	0.08	0.002573	0.147414
5	0.10	0.005025	0.287918
6	0.12	0.008683	0.497523
7	0.14	0.013789	0.790048
8	0.16	0.020583	1.179314
9	0.18	0.029307	1.679141
10	0.20	0.040201	2.303348
11	0.22	0.053508	3.065756
12	0.24	0.069467	3.980185
13	0.26	0.088322	5.060455
14	0.28	0.110312	6.320387
15	0.30	0.135678	7.773799
16	0.32	0.164663	9.434513
17	0.34	0.197508	11.316348
18	0.36	0.234452	13.433125
19	0.38	0.275739	15.798663
20	0.40	0.321608	18.426783
21	0.42	0.372302	21.331305
22	0.44	0.428060	24.526049
23	0.46	0.489126	28.024834
24	0.48	0.555739	31.841482
25	0.50	0.628141	35.989811
26	0.52	0.706573	40.483643
27	0.54	0.791276	45.336797
28	0.56	0.882492	50.563094
29	0.58	0.980462	56.176352

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що процес повороту лопатей характеризується поступовим збільшенням кута повороту від початкового нульового значення до максимального значення наприкінці моделювання. Зміна кута відбувається плавно, без різких коливань, що свідчить про стабільний характер роботи приводу механізму повороту лопатей. Представлення результатів у градусах забезпечує наочне відображення зміни положення лопатей у часі та дозволяє оцінити динаміку їх переміщення.

Відповідно до результатів моделювання встановлено, що для повного закриття лопатей вітрогенератора електродвигун повинен перебувати у ввімкненому стані протягом 0,66 с. Отримане значення характеризує часові параметри роботи системи керування та може бути використане для подальшого аналізу ефективності функціонування механізму регулювання.

На основі даних таблиці 2.7 побудовано математичну залежність кута повороту лопатей від часу роботи електродвигуна. Для опису зазначеної залежності було виконано апроксимацію експериментальних даних. З використанням бібліотеки SciPy проведено поліноміальну апроксимацію, оскільки досліджуваний процес має плавний і безперервний характер, що забезпечує можливість його адекватного опису поліноміальною функцією. Нижче наведено програмний код, який реалізує процедуру апроксимації та виведення отриманої математичної залежності. (Рисунок 2.9)

```

import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit

time = np.array([0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16,
0.18, 0.20, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.32, 0.34, 0.36, 0.38, 0.40,
0.42, 0.44, 0.46, 0.48, 0.50, 0.52, 0.54, 0.56, 0.58, 0.60, 0.62, 0.64,
0.66])

angle_rad = np.array([0.000000, 0.000040, 0.000322, 0.001085, 0.002573,
0.005025, 0.008683, 0.013789, 0.020583, 0.029307, 0.040201, 0.053508,
0.069467, 0.088322, 0.110312, 0.135678, 0.164663, 0.197508, 0.234452,
0.275739, 0.321608, 0.372302, 0.428060, 0.489126, 0.555739, 0.628141,
0.706573, 0.791276, 0.882492, 0.980462, 1.085427, 1.197628, 1.317307,
1.444704])

def polynomial_func(t, a, b, c):
    return a * t**2 + b * t + c

params, _ = curve_fit(polynomial_func, time, angle_rad)
a, b, c = params

print(f" Blade angle (rad)) = {a:.4f} * t^2 + {b:.4f} * t + {c:.4f}")

```

Рисунок 2.9 - Отримання математичної моделі

Після запуску програмного коду була отримана математична функція, яка апроксимує залежність кута повороту лопатей від часу включення двигуна за даними таблиці 2.8:

$$c_p(t) = at^2 + bt + c \quad (2.24)$$

Тут t представляє час включення двигуна, а значення коефіцієнтів ($a=293.6769$, $b=-81.0778$, $c=4.9338$) визначені в результаті апроксимації.

Проведена робота є комплексним підходом до розробки та дослідження системи управління положенням лопатей вертикально-осьового вітрогенератора. Була розроблена деталізована динамічна модель, що враховує різні параметри та фактори, що впливають на роботу системи. За допомогою програмного моделювання вдалося чисельно визначити поведінку системи та виявити оптимальні стратегії управління. Для зручності аналізу отриманих даних проведено математичну апроксимацію, що дозволяє описати залежність між часом роботи мотора і кутом повороту лопатей у вигляді математичної функції.

Створений механізм управління включає важільну систему та зубчасту передачу, що забезпечують ефективну передачу обертального руху від двигуна до лопат. Отримані результати та розроблена модель можуть бути використані для подальших досліджень та вдосконалення системи управління положенням лопатей вітрогенератора. Це може сприяти підвищенню ефективності та надійності роботи вітрогенераторів, що має велике значення в галузі відновлюваної енергетики та екологічної стійкості.

2.3.3. Розробка блоку керування

Схема, показана на рисунку 2.10, являє собою розімкнену систему управління, в якій вітродвигун (1) при нормальній роботі обертається навколо своєї осі, передаючи механічну енергію системі генератора (2) [5] і, крім того, перетворення ланцюг (3) і вихідне підключення навантаження або індикатора.



Рисунок 2.10 – Загальна схема системи управління ротором:

1 - вітродвигун, 2 - система генератора, 3 - схема перетворення, 4 - індикатор, 5 - анемометр, 6 - датчик обертання, 7 - магніт, 8 - мікроконтролер, 9 - кроковий двигун, 10 - лопаті

При перевищенні максимального граничного значення швидкості вітру фіксується за допомогою анемометра, здійснюється контроль лопатей вітроустановки. Анемометр є крильчаткою, що обертається (5) за наявності вітру [16], з датчиком обертання (6), закріпленим на її нерухомій частині, і магнітом (7) на рухомій частині. У вигляді імпульсів сигнал надходить на мікроконтролер (8) при обертанні крильчатки анемометра. Мікроконтролер за заданим алгоритмом управляє кроковим двигуном (9), що приводить в рух лопаті вітрогенератора (10). Ці імпульси обробляються мікроконтролером і перетворюються на значення швидкості вітру. З цього значення здійснюється управління лопатями вітрогенератора. Живлення для електричної схеми береться від джерела живлення електронної схеми [17].

2.3.3 Визначення математичної моделі блоку управління мехатронної системи шестилопатевого вітрогенератора «ВІНД ГЕНЕРАТОРА В-1000»

На рисунку 2.11 показано та описано складові САУ елементи, наведено схему управління лопатями вітрогенератора без зворотного зв'язку.



Рисунок 2.11 - Схема керування лопатями вітрогенератора

А – анемометр, П – потенціометр, Д – двигун, Р – редуктор

Мікроконтролер обробляє сигнал з анемометра (датчик швидкості вітру) значення кута відхилення двигуна (Д). Тобто, при цьому відхиленні відбувається подача напруги на підсилювач і далі двигун, який змушує повертати лопаті на певний кут. Для складання передавальної функції розімкнутої системи було введено наступні позначення:

α_1 - кут відхилення, що обробляється мікроконтролером з анемометра;
 α_2 – кут повороту лопатей.

Таким чином, передавальна функція розімкнутої системи управління вітрогенератором має вигляд:

$$W(p) = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (2.25)$$

Далі необхідно визначити передавальні функції окремо взятих ланок. Спочатку визначимо передатну функцію потенціометра. Оскільки потенціометр є безінерційною ланкою [118], його передатна функція визначається таким чином:

$$W_1(p) = \frac{u_{\text{вх}}}{\alpha_1} = K_1 \quad (2.26)$$

де K_1 - значення крутості потенціометра.

Далі необхідно визначити значення передавальної функції підсилювача. Враховуючи, що підсилювач є безінерційною ланкою, передатна функція підсилювача має вигляд [119]:

$$W_2(p) = \frac{u_{\text{вх}}}{u_{\text{вх}}} = K_2 \quad (2.27)$$

де K_2 - коефіцієнт посилення по напрузі.

При визначенні передавальної функції двигуна з редуктором допустима зневага перехідними процесами [20], що виникають в обмотці управління:

$$W_3(p) = \frac{K_3}{p(1+T_d p)} \quad (2.28)$$

де, K_3 - коефіцієнт передачі двигуна (з редуктором) за швидкістю;

T_d – електромеханічна постійна за часом.

На наступному етапі здійснюється визначення передатної функції об'єкта керування. Враховуючи, що кутова швидкість повороту лопатей є пропорційною величині відхилення сигналу, який обробляється мікроконтролером на основі даних, отриманих від анемометра, кут повороту лопатей визначається як інтеграл від кутової швидкості за часом.

Отже, динамічні властивості об'єкта можуть бути описані інтегруючою ланкою, унаслідок чого передатна функція об'єкта набуває такого вигляду:

$$T_d T_o p^4 + (T_d + T_o) p^3 + p^2 + K = 0 \quad (2.29)$$

Для визначення коефіцієнтів передавальної функції математичної моделі системи управління лопатями вітрогенератора необхідно провести експериментальні дослідження лабораторної моделі.

2.4 Розробка математичної моделі блоку управління кутом атаки багатолопатевого вітрогенератора

У даному розділі досліджується можливість підвищення ефективності функціонування вертикально-осьового вітрогенератора шляхом впровадження автоматизованої системи керування кутом атаки лопатей. Розглянуто методику визначення оптимального положення лопатей, що забезпечує максимальне вироблення електричної енергії за різних режимів роботи установки.

Запропоновано структуру системи автоматичного керування, функціонування якої базується на обробці даних, отриманих від датчиків кутової швидкості обертання вітроколеса, анемометра та датчиків поточного положення лопатей. Реалізація автоматичного регулювання здійснюється за допомогою системи керування, яка забезпечує зміну кута атаки лопатей відповідно до

параметрів вітрового потоку та режиму роботи вітроенергетичної установки.

У межах дослідження проведено порівняльний аналіз двох лабораторних моделей вертикально-осьових вітрогенераторів — із системою автоматичного керування кутом атаки лопатей та без неї. Вітроколесо виконує перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну енергію обертального руху, яка надалі передається генератору для вироблення електричної енергії.

Стабільність частоти обертання генератора та вітроколеса забезпечується за умови, що потужність, необхідна для компенсації моменту опору генератора, відповідає потужності, яка передається вітроколесу від вітрового потоку. У разі порушення даного енергетичного балансу спостерігається зниження частоти обертання вітроколеса.

Для забезпечення максимального вилучення енергії вітру за різних швидкостей повітряного потоку необхідним є регулювання швидкості обертання турбіни відповідно до її оптимального значення для поточних умов роботи. Для кожного значення швидкості вітру існує певний режим роботи, за якого досягається максимальна потужність вітроенергетичної установки при відповідній швидкості обертання вітроколеса. [13].

2.4.1 Розрахунок оптимального положення лопатей

Для початку було визначено оптимальне положення лопат вітрогенератора, яке дозволить отримати максимальну енергію від вітру. Потужність P_k , що виробляється вітрогенератором, залежить від потужності кожної лопаті вітрогенератора відповідно до формули [24]:

$$P_k = \sum_{i=1}^4 P_i, \quad (2.30)$$

де, P_i - Потужність кожної з лопатей, що розвивається.

Для досягнення максимальної ефективності роботи вітрогенератора, його лопаті повинні створювати оптимальне значення аеродинамічного опору, змінюючи своє положення зі зміною швидкості вітру та напрямки для використання сили вітру F_B у максимальному обсязі відповідно до формули [25]:

$$F_B = \frac{mV_B^2}{2}, \quad (2.31)$$

де, m – маса вітрового потоку, V_B – швидкість вітру.

На рисунку 2.12 показано оптимальне розташування лопатей, при якому буде використано силу вітру в максимальному обсязі. Так як швидкість вітру і його напрямок є величинами не постійними, необхідно розробити систему управління для забезпечення заданого положення лопатей при напрямі вітру V , що змінився, і заданої швидкості обертання ротора ω_k . Крім того, що для ефективної роботи автоматичної системи управління лопатями необхідно мати інформацію не тільки V та ω_k , але і лінійну швидкість ротора V_k а також вплив цих параметрів на поточне значення кутового положення лопатей α [16].

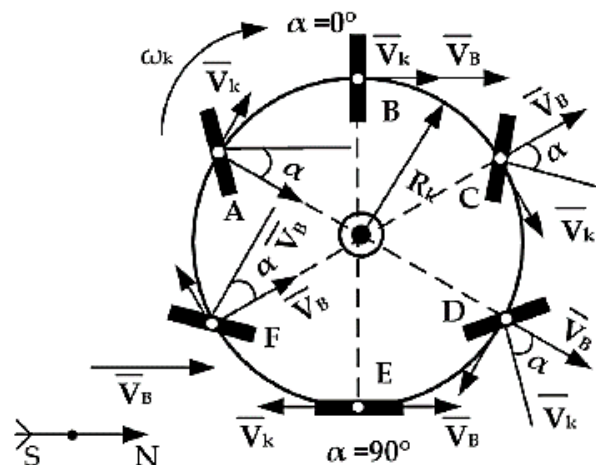


Рисунок 2.12 – Положення лопатей відповідно до поточного напрямку вітру та кутової швидкості обертання

Для цього необхідно визначити потужність, що виробляється лопатями А і С відповідно до формули [17]:

$$P_{AC} = P_A + P_C = 2 \frac{\rho S}{2(V_V \cos \alpha - V_L)^2} * V_K, \quad (2.32)$$

де, ρ - щільність повітря,

S - площа лопаті,

V_L - лінійна швидкість лопаті,

α - кут між напрямом швидкості вітрового потоку та перпендикуляром до площини певної лопаті.

2.4.2 Розрахунок системи керування положенням лопатей

Згідно з виразом (2.32), для установки лопатей А і С необхідно налаштувати систему керування з використанням датчиків кутової швидкості обертання вітроколеса і анемометра (для вимірювання швидкості вітру). Вираз (2.70) задає початкове положення кута лопат А і С [10]. Обертання цих лопатей щодо встановленого кута відбувається з кутовою швидкістю ω_k .

При установці лопат А і С під кут, розрахований за виразом (2.30), лопата В приймає максимальний потік вітру, перебуваючи перпендикулярно його напрямку, тоді як лопата D орієнтується паралельно VB для мінімізації аеродинамічного опору [11].

При зміні напрямку вітру автоматична система керування коригує керуючі сигнали в часі, забезпечуючи поворот лопатей відповідно до сигналів θ_k і φ (кут зміни напрямку вітру). Процес управління виконується згідно з малюнком 2.13 та даними таблиці 2.8, де вказано тимчасову затримку при зміні кута атаки лопатей при зміні напрямку вітру.

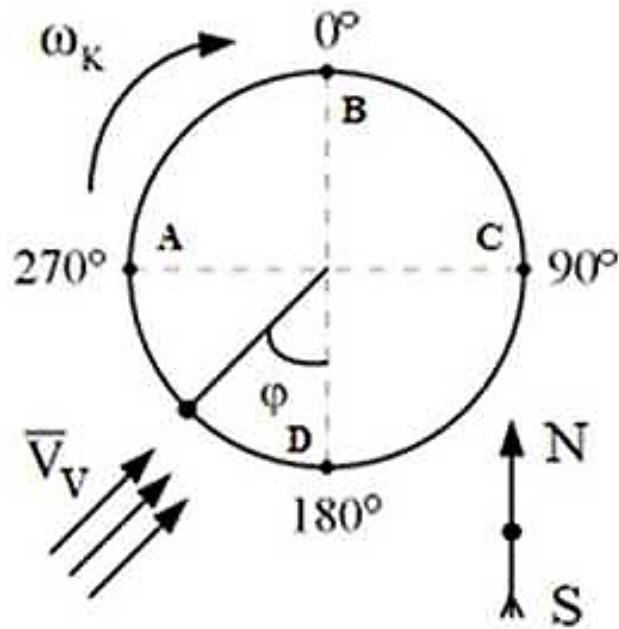


Рисунок 2.13 - Зміна кута напрямку вітру на кут φ

Таблиця 2.8 - Тимчасова затримка при зміні кута атаки лопатей при зміні напрямку вітру

Відхилення напрямку вітру на кут φ	Тимчасова затримка
0	$t = 0$
$0 < \varphi < 90$	$t = \omega / \varphi$
$90 < \varphi < 180$	$t = \omega / \varphi - 90$
$180 < \varphi < 270$	$t = \omega / \varphi - 180$
$270 < \varphi < 360$	$t = \omega / \varphi - 270$

Було розроблено модель управління кутом атаки лопатей вітрогенератора. На основі виконаних розрахунків створено загальну функціональну схему

управління лопатями вертикально-осьового вітрогенератора (рисунок 2.14). Припустимо, що напрямок вітру - південь-північ. Схема включає чотири канали управління, по одному для кожної лопаті А, В, С і D. Положення лопатей визначається напрямом вітрового потоку, розрахунковою потужністю, кутовою швидкістю обертання вітрогенератора та швидкістю вітру. Для обліку цих параметрів використовуються датчики, що включені в ланцюг зворотного зв'язку.

Наступним кроком є вибір типу регулятора та закону регулювання. На рисунку 2.15 представлена схема одного каналу керування положенням лопаті. Відповідно до рисунка 2.14 елементи 1, 2, 3 і 4 формують необхідне положення лопаті на основі поточних значень швидкості вітру та обертання вітрогенератора.

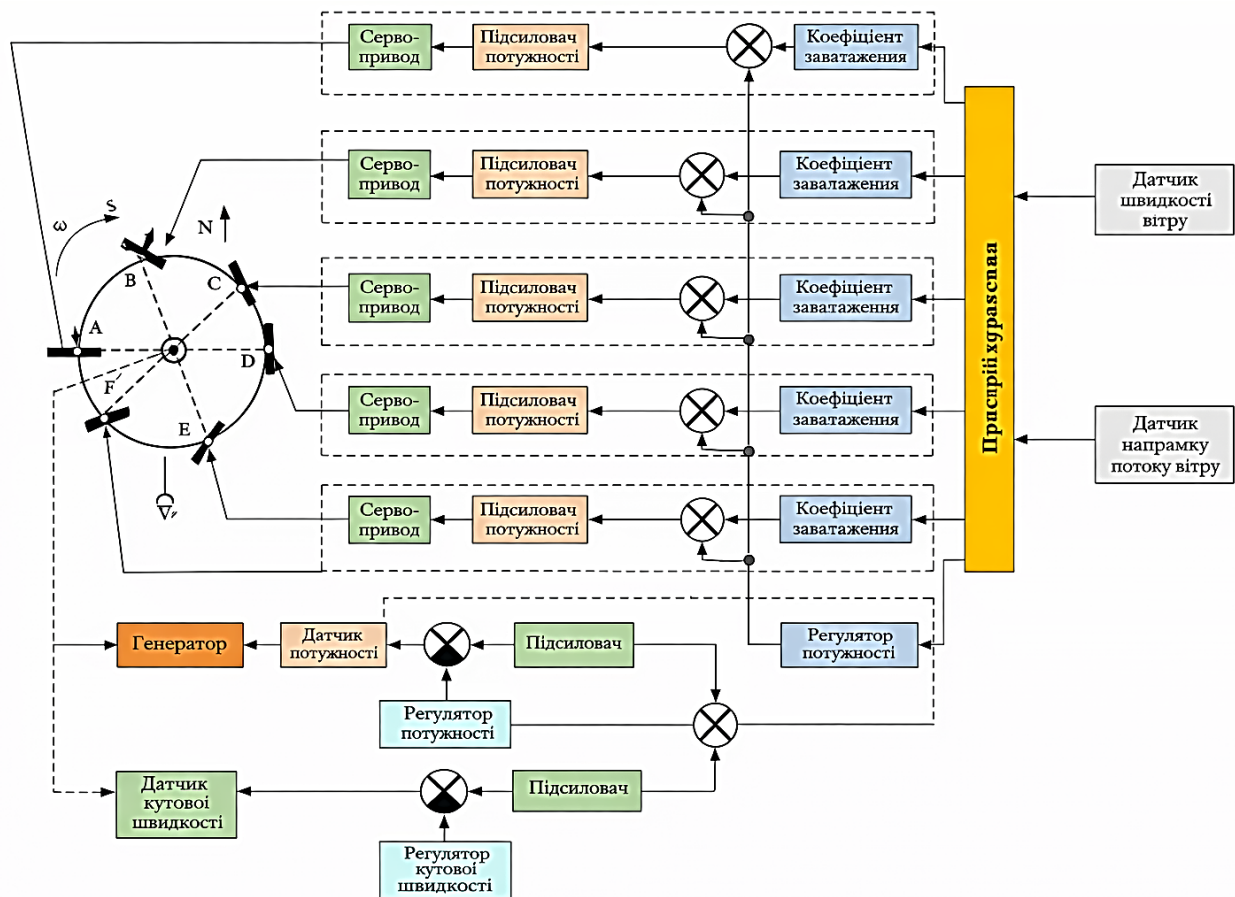


Рисунок 2.14 – Загальна функціональна схема управління лопатями вертикально-осьового вітрогенератора: А, В, С, D – лопаті

Величина значення кута, що задає, обчислюється відповідно до формули 2.70 і таблиці 2.8 у блоці 4 на рисунку 2.15. За допомогою ланцюга зворотний зв'язок реалізується закон ПД управління. Цей регулятор буде реалізовуватися на промисловому контролері. Далі розроблено математичну модель системи управління кутом атаки лопаті, для цього застосовується середовище моделювання Matlab/Simulink, показане на рисунку 2.16. Результати моделювання математичної моделі показано на рисунку 2.17.

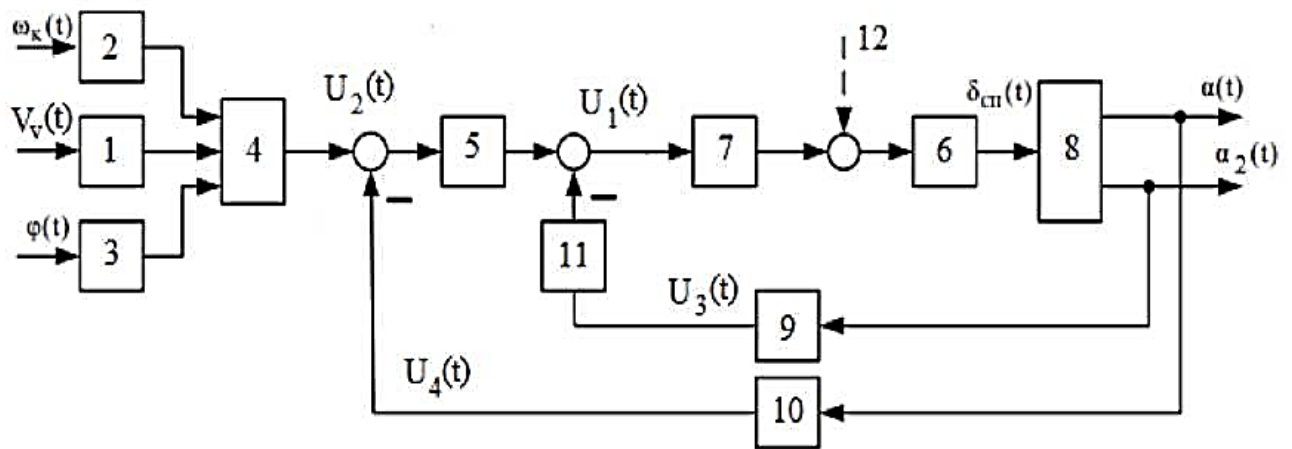


Рисунок 2.15- Схема одного каналу управління положенням лопаті вітрогенератора

1 - Анемометр; 2 - датчик кутової швидкості; 3 - датчик напрямку вітрового потоку; 4 - розрахунок кутового положення за формулою 3.15; повтора лопаті, 11 - підсилювач, 12 - результат підсистеми контролю кутової швидкості та потужності (вихідний сигнал із суматора 9 на рисунку 3)

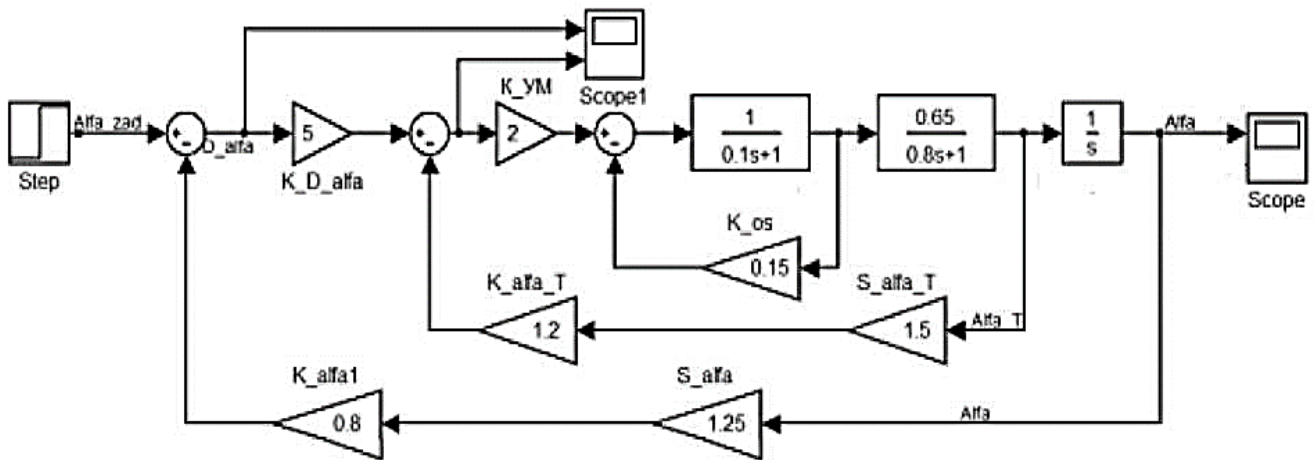


Рисунок 2.16 - Математична модель управління лопатею вітрогенератора

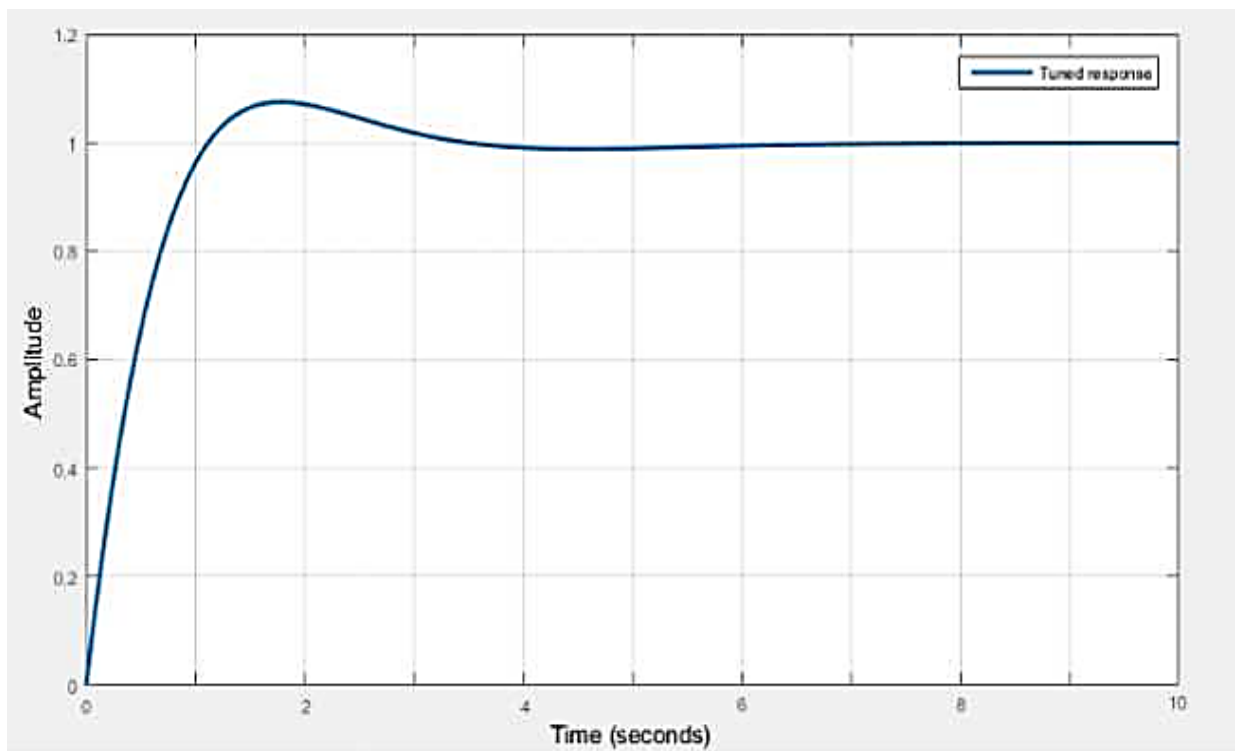


Рисунок 2.17 – Результат моделювання

Як очевидно з малюнка 2.17, система регулювання положенням лопатей є працездатною.

2.5 Висновки до Глави 2

Таким чином, одним із найпростіших і найбільш поширених методів керування вихідною потужністю вітроенергетичної установки є підтримання сталої частоти обертання вітроколеса. Проте застосування даного підходу не забезпечує ефективної роботи вітрогенератора в широкому діапазоні швидкостей вітрового потоку, що обумовлює необхідність використання систем захисту при перевищенні номінальної швидкості вітру.

Більш ефективним вважається метод керування зі змінною частотою обертання вітроколеса, за якого швидкість обертання адаптується до поточних параметрів вітрового потоку. Такий підхід забезпечує підтримання оптимального режиму роботи вітроенергетичної установки та підвищує ефективність перетворення енергії вітру в електричну енергію. Аналіз існуючих методів керування показав, що для заданих кліматичних умов найбільш доцільним є регулювання кута атаки лопатей, оскільки цей метод дозволяє максимально ефективно використовувати енергію вітрового потоку та забезпечує можливість коригування режимів роботи установки при критичних швидкостях вітру.

У межах даного розділу було розроблено програмне забезпечення мовою Python, яке здійснює отримання прогнозованих значень швидкості вітру з сервісу AccuWeather. На основі отриманих метеорологічних даних виконано розрахунок прогнозованої вихідної потужності вітрогенератора. Для підвищення точності прогнозування застосовано метод експоненціального згладжування, що дало змогу уточнити прогнозовані значення параметрів.

Після обробки даних було повторно виконано розрахунок прогнозованої потужності та проведено її порівняння з фактичними значеннями потужності, визначеними за реальними показниками швидкості вітру. У результаті встановлено, що середня похибка прогнозування за вихідними даними сервісу становила 5,11 %, тоді як після застосування методу експоненціального

згладжування вона зменшилася до 4,57 %. Отримані результати свідчать про підвищення точності прогнозування на 0,54 %.

Крім того, у процесі дослідження були отримані математичні моделі двох блоків системи керування. Для уточнення їх числових параметрів та підвищення достовірності моделювання необхідним є проведення додаткових експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання режимів роботи вітроенергетичної установки..

Глава 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Загальні положення

Експлуатація вітрогенераторів відноситься до видів діяльності з підвищеною небезпекою, оскільки пов'язана з впливом електричного струму високої напруги, роботою на висоті, механічними елементами, що рухаються, несприятливими метеорологічними умовами і підвищеним рівнем шуму. Сучасні вітроенергетичні установки (ВЕУ) є складними електромеханічними системами, що включають генератор, перетворювач частоти, систему управління, механічну передачу, лопаті ротора і допоміжне обладнання.

Основним завданням охорони праці під час експлуатації вітрогенераторів є забезпечення безпечних умов праці персоналу, попередження виробничого травматизму, професійних захворювань, аварійних ситуацій та негативного впливу виробничих факторів на працівників.

При експлуатації вітроенергетичних установок необхідно керуватися вимогами нормативних документів з охорони праці, правилами технічної експлуатації електроустановок, правилами пожежної безпеки, санітарними нормами та інструкціями з експлуатації обладнання.

Дана установка є засобом видобутку електричної енергії найбільш екологічним та безвідходним для навколишнього середовища методом. Проектовану конструкцію потрібно встановлювати у відкриту зону, на селитебну територію, оскільки роботи установки необхідна активна взаємодія Космосу з вітровими потоками.

Розрахунковий термін служби сучасних ВЕС становить 25 років [3]. В процесі експлуатації ВЕС впливають на людину, флору і фауну, землекористування у вигляді шумів, вібрацій, електромагнітного

випромінювання, оптичних ефектів, механічного впливу та відходів експлуатації.

Найбільше запитань викликає вплив вітропарків на орнітофауну. Як основні фактори їх впливу можна виділити фізичну дію при зіткненні з турбінами, лопатями та вежами; порушення довкілля: порушення маршруту міграції птахів.

Смертність птахів внаслідок зіткнення з ВЕС незначна порівняно зі смертністю від іншої діяльності. Більше того, було отримано питомі показники смертності птахів на ГВт год виробленої електроенергії з використанням різних видів палива (розглядався весь життєвий цикл продукції від видобутку палива до транспортування електроенергії). Цей показник становить 0,3 для ВЕС, 0,4 для АЕС та 5,2 смертельних випадків для ТЕЦ на викопному паливі [4].

Можливі засоби захисту - перефарбування лопатей вітрогенераторів у чорний колір. Це різко зменшує кількість випадків загибелі птахів.

Вітрові генератори не можуть знаходитися близько один до одного, оскільки внаслідок інтерференції їхня потужність буде зниженою. Тому їх розміщення потребує значного відчуження земель. Вітрові електростанції вимагають приблизно 0,1 км² вільного простору на 1 мегават номінальної потужності. Відповідно, електростанції потужністю 200 мегават знадобиться близько 20 км² [5].

Можливі способи запобігання - нині, сучасні ВЕУ не мають значного впливу рослинність і тваринництво. Тому землю навколо установки можна використовувати у сільському господарстві.

Шум, що виробляється 10-ма вітрогенераторами на відстані 350 м можна оцінити, як незначний, не відмінний від інших шумів у звичайному житті. Розрахований рівень шуму в межах житлової зони забудови буде в інтервалі 35-44 дБА, що відповідає вимогам санітарних норм «Шум на робочих місцях, у приміщеннях житлових, громадських будівель та на території житлової забудови». Відповідно до норм, рівень шуму для територій, що безпосередньо

прилягають біля житлових будинків, не повинен перевищувати 45 дБА та 55 дБА з 23 до 7 годин та з 7 до 23 годин відповідно [6].

В даний час поширені два основні методи утилізації. Перший – механічний метод переробки лопатей. Він досить простий і включає три етапи: демонтаж і поділ на частини для більш легкої транспортування; механічне подрібнення із вилученням смоли; відділення більших волокон від дрібніших волокон і гранул. Другий сценарій – термічний спосіб переробки лопатей. Найпростіший різновид - спалювання. Але після спалювання утворюється велика кількість золи. «Перспективним методом є піроліз (нагрівання без доступу кисню при 500 градусах Цельсія), в результаті якого волокна лопатей можна повторно використовувати, а газ, що утворюється, спалювати для отримання електроенергії. Процеси утилізації повинні відповідати всім нормам

До робіт з обслуговування та експлуатації вітроенергетичних установок допускаються особи не молодші 18 років.

- медичний огляд;
- професійну підготовку;
- вступний інструктаж;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- перевірку знань з охорони праці та електробезпеки;
- стажування та перевірку практичних навичок.

Персонал, що обслуговує вітроенергетичні установки, повинен мати відповідну групу електробезпеки в залежності від рівня напруги обладнання.

Особлива увага приділяється дотриманню вимог безпеки під час виконання монтажних, налагоджувальних та ремонтних робіт на висоті, оскільки більшість елементів вітроенергетичної установки розташована на значній висоті.

Мікроклімат у виробничих умовах визначається такими параметрами:

- 1) температура повітря;

- 2) відносна вологість повітря;
- 3) швидкість руху повітря.

Основними причинами відхилень показників мікроклімату від норми є верстати. А саме, працюючі приводи подач та шпинделя.

Також на відхилення параметрів мікроклімату впливає виділення тепла у процесі різання заготовки.

Для забезпечення оптимальних та допустимих показників мікроклімату в холодну пору року застосовуються засоби захисту робочих місць від зашкленних поверхонь віконних отворів, щоб не було охолодження, зокрема використовуються жалюзі. У теплий період року передбачено захист від потрапляння прямих сонячних променів. Також у приміщенні є кондиціонери для підтримки необхідних умов.

Роботи поділяються на три категорії тяжкості на основі загальних енерговитрат організму. Складність робіт операторів верстатів належить до категорії середніх. Оптимальні та допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні виробничих приміщень повинні відповідати значенням

3.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації вітрогенераторів на працівників впливає низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

3.2.1 Електричний струм

Одним із найбільш небезпечних виробничих факторів під час експлуатації вітроенергетичних установок є вплив електричного струму. До складу вітроенергетичної установки входять електричні кола високої напруги, силові

перетворювачі, розподільні пристрої, системи керування та кабельні лінії, що створює підвищений рівень електробезпеки для обслуговуючого персоналу.

Ураження електричним струмом може виникати внаслідок безпосереднього контакту зі струмоведучими частинами, пошкодження або старіння ізоляції, порушення роботи систем заземлення, пробоя напруги на корпус електрообладнання, а також через помилкові дії персоналу під час виконання ремонтних чи профілактичних робіт. Особливу небезпеку становить проведення робіт усередині гондоли вітрогенератора, де розташована значна кількість електротехнічного обладнання та комутаційних пристроїв.

3.2.2 Робота на висоті

Технічне обслуговування та ремонт вітроенергетичних установок пов'язані з виконанням робіт на значній висоті, яка у сучасних установках може перевищувати 50–100 м. За таких умов суттєво зростає ризик виробничого травматизму, пов'язаного з падінням працівників, інструментів або матеріалів.

Додаткову небезпеку створюють пориви вітру, що можуть спричинити втрату рівноваги персоналом, а також несприятливі погодні умови, зокрема зледеніння сходових конструкцій, платформ та обслуговуючих майданчиків. Найбільш небезпечними етапами виконання робіт є підйом і спуск усередині вежі вітроустановки, а також обслуговування елементів гондоли та лопатей ротора.

3.2.3 Рухомі механізми

У процесі роботи вітроенергетичної установки здійснюється обертання лопатей ротора, валів, редуктора та інших механічних вузлів, що створює значну механічну небезпеку для персоналу.

Основними небезпечними факторами є можливість захоплення одягу або частин тіла рухомими елементами, отримання механічних травм унаслідок контакту з обертовими деталями, а також ризик руйнування лопатей чи окремих конструктивних елементів установки. У разі аварійних ситуацій можливий розліт фрагментів конструкцій на значну відстань, що становить загрозу як для персоналу, так і для навколишньої інфраструктури.

3.2.4 Підвищений рівень шуму та вібрації

Експлуатація вітроенергетичних установок супроводжується виникненням шуму та вібрацій, джерелами яких є робота генератора, редуктора, систем охолодження, а також аеродинамічна взаємодія лопатей ротора з повітряним потоком.

Тривалий вплив шуму на організм людини може призводити до погіршення слуху, підвищеної втомлюваності, зниження концентрації уваги та виникнення нервово-психічних розладів. Вібраційні навантаження також негативно впливають на функціональний стан організму працівників і за тривалої дії можуть стати причиною розвитку професійних захворювань. Особливо небезпечним є поєднаний вплив шуму, вібрації та психоемоційного навантаження під час виконання робіт у складних метеорологічних умовах.

3.2.5 Несприятливі кліматичні умови

Експлуатація вітроенергетичних установок здійснюється під впливом довкілля. Небезпеку становлять:

сильний вітер;

низькі температури;

атмосферні опади;
грозові розряди;
зледеніння конструкцій.

За несприятливих погодних умов збільшується ймовірність падіння працівників, пошкодження обладнання та виникнення аварійних ситуацій.

3.2.6 Пожежна небезпека

Джерелами виникнення пожежі можуть бути:

короткі замикання;
перегрів електричних з'єднань;
ушкодження ізоляції;
витік олії з редуктора;
попадання блискавки.

Пожежа в гондолі вітроенергетичної установки особливо небезпечна через складність доступу до осередку займання.

3.3 Вимоги безпеки під час експлуатації вітрогенераторів

3.3.1 Організація безпечної експлуатації

Безпечна експлуатація вітроенергетичних установок повинна забезпечуватися комплексом організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання виробничому травматизму, аварійним ситуаціям та професійним захворюванням персоналу.

До основних організаційних заходів належать призначення відповідальних осіб за безпечне виконання робіт, оформлення нарядів-допусків, проведення

вступних, первинних та періодичних інструктажів з охорони праці, здійснення контролю технічного стану обладнання, а також регулярна перевірка рівня професійної підготовки та знань обслуговуючого персоналу.

Технічні заходи безпеки передбачають відключення обладнання перед проведенням ремонтних або профілактичних робіт, установлення попереджувальних знаків і плакатів, заземлення струмопровідних елементів, застосування систем блокування та використання захисних пристроїв і засобів автоматичного захисту. Реалізація зазначених заходів забезпечує мінімізацію ризику ураження електричним струмом, механічного травмування та виникнення аварійних режимів роботи обладнання.

3.3.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком виконання робіт обслуговуючий персонал зобов'язаний провести перевірку технічного та санітарного стану робочого місця, а також переконався у справності засобів індивідуального захисту. Особлива увага повинна приділятися перевірці страхувальних систем, сходових конструкцій, підйомних механізмів та інших елементів, що забезпечують безпечне виконання робіт на висоті.

До початку робіт необхідно перевірити відсутність механічних пошкоджень обладнання, ознайомитися з поточними метеорологічними умовами та впевнитися у відсутності сторонніх осіб у межах небезпечної зони. Виконання робіт забороняється у випадку несприятливих погодних умов або перевищення допустимої швидкості вітру, встановленої технічною документацією виробника вітроенергетичної установки.

3.3.3 Вимоги безпеки під час роботи

Під час експлуатації вітроенергетичних установок персонал повинен суворо дотримуватися вимог нормативної документації, інструкцій з експлуатації та правил охорони праці. Виконання робіт допускається лише за умови використання справних засобів індивідуального захисту, зокрема захисних касок, страхувальних систем, діелектричних рукавиць та спеціального робочого одягу.

У процесі роботи необхідно контролювати технічні параметри функціонування обладнання, дотримуватися вимог електробезпеки та уникати наближення до рухомих елементів конструкції. Роботи всередині гондоли вітроустановки повинні виконуватися щонайменше двома працівниками, що забезпечує можливість оперативного реагування у разі виникнення аварійної ситуації.

Під час експлуатації категорично забороняється виконувати ремонтні роботи при обертанні ротора, використовувати несправний інструмент або обладнання, проводити роботи без застосування страхувальних засобів, а також перебувати під піднятим вантажем чи в зоні дії вантажопідіймальних механізмів.

3.3.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після завершення робіт необхідно здійснити відключення обладнання відповідно до встановлених вимог безпеки, привести робоче місце до належного стану та прибрати використаний інструмент і допоміжні матеріали.

Обслуговуючий персонал зобов'язаний повідомити відповідальну особу про всі виявлені несправності, дефекти або відхилення в роботі обладнання. Крім того, результати виконаних робіт, інформація про технічний стан установки та зафіксовані зауваження повинні бути внесені до експлуатаційного журналу для

забезпечення належного контролю технічного стану вітроенергетичної установки та планування подальших профілактичних заходів.

3.4. Електробезпека під час експлуатації вітрогенераторів

Вітроенергетичні установки відносяться до електроустановок підвищеної небезпеки. Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- захисне заземлення;
- занулення;
- автоматичне відключення живлення;
- застосування пристроїв захисного відключення;
- використання ізолюючих засобів захисту.

Усі металеві частини обладнання, які можуть опинитися під напругою, мають бути надійно заземлені.

Опір заземлювального пристрою повинен відповідати вимогам нормативних документів.

Для захисту персоналу застосовуються такі засоби:

- діелектричні рукавички;
- діелектричне взуття;
- ізолюючі штанги;
- показчики напруги;
- переносні заземлення.

Роботи на струмопровідних частинах повинні виконуватися тільки після повного зняття напруги та перевірки її відсутності.

У разі виникнення аварійної ситуації необхідно:

Негайно вимкнути живлення.

Звільнити постраждалого від дії електричного струму.

Викликати медичну допомогу.

Надати першу долікарську допомогу.

3.6. Пожежна безпека

Пожежна безпека вітроенергетичних установок повинна забезпечуватися комплексом організаційних, технічних та профілактичних заходів, спрямованих на попередження виникнення загорянь, обмеження поширення пожежі та забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу.

Основними причинами виникнення пожеж у вітроенергетичних установках є короткі замикання в електричних колах, перегрів підшипникових вузлів, пошкодження кабельних ліній, витік мастильних матеріалів та олив, а також вплив атмосферних перенапруг, зокрема попадання блискавки. Підвищена пожежна небезпека зумовлена наявністю електротехнічного обладнання, горючих матеріалів та обмеженим доступом до окремих елементів конструкції установки.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно здійснювати регулярне технічне обслуговування обладнання, контролювати стан електричної ізоляції, перевіряти надійність електричних контактів та з'єднань, а також забезпечувати належний санітарний стан устаткування і своєчасне очищення його від пилу, мастильних матеріалів та інших забруднень. Важливим елементом системи пожежної безпеки є використання автоматичних систем виявлення та гасіння пожеж, які забезпечують оперативне реагування у разі виникнення аварійної ситуації.

Усередині гондоли вітроенергетичної установки повинні бути передбачені первинні засоби пожежогасіння, зокрема вогнегасники відповідного типу, засоби оперативного зв'язку для повідомлення про надзвичайні ситуації, схеми евакуації

персоналу та аптечка для надання першої домедичної допомоги. Наявність і справність зазначених засобів є обов'язковою умовою забезпечення безпечної експлуатації вітроенергетичних установок. Вкрай важливо мати адекватні умови праці під час роботи, і тому висвітлення робочої зони є найважливішим аспектом забезпечення того, щоб людина почувала себе комфортно на роботі. Висвітлення - один із найважливіших факторів, який повинен враховувати роботодавець, оскільки погане освітлення може призвести до втоми та підвищити психологічну та фізичну напругу.

Природне світло виходить від сонця, а також відноситься до будь-якого світла, яке розсіюється природним чином. Зазвичай він варіюється в залежності від часу доби, місяця року, розташування та регіону, в якому він випромінюється. Штучне освітлення одержують від електричних джерел. Коли природного висвітлення недостатньо, використовується штучне висвітлення. Використання як природного, так і штучного світла призводить до комбінованого джерела світла.

Висновки

Експлуатація вітрогенераторів пов'язана з впливом великої кількості небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Основними небезпеками є ураження електричним струмом, робота на висоті, вплив рухомих механізмів, несприятливі кліматичні умови та пожежна небезпека.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно застосовувати комплекс організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів, використовувати сучасні засоби захисту та суворо дотримуватись вимог нормативних документів.

Правильна організація охорони праці під час експлуатації вітроенергетичних установок дозволяє знизити рівень виробничого травматизму, підвищити надійність обладнання та забезпечити ефективну роботу об'єктів вітроенергетики.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень можна виділити такі результати:

З аналізу різних методів управління вітрогенераторами було обрано оптимальний спосіб - управління кутом атаки лопатей. Цей метод дозволяє ефективно контролювати роботу вітрогенератора при критичних швидкостях вітру та максимально використовувати енергію вітрового потоку.

Була створена програма мовою Python для отримання прогнозу швидкості вітру із сайту Accuweather. На основі цих даних було розраховано прогноз вихідної потужності вітрогенератора. Для підвищення точності застосовувався метод експонентного згладжування, який дозволив уточнити прогнозні значення. Після обробки даних розрахункова потужність була зіставлена з фактичною, визначеною реальною швидкістю вітру. Середня помилка прогнозування за даними сайту склала 5,11%, а після застосування методу згладжування знизилася до 4,57%, що вказує на поліпшення точності прогнозу на 0,54%.

Також було розроблено та досліджено систему управління положенням лопатей вертикально-осьового вітрогенератора. Було отримано значення амплітуди вихідної напруги для двох лабораторних моделей: для моделі без системи управління амплітуда становила 5,2 В, а після впровадження розробленої системи управління - 5,6 В. Таким чином, ефективність роботи вітрогенератора збільшилася на 7,69%.

В рамках роботи було розроблено та протестовано систему діагностики основних вузлів вітрогенератора з використанням ІТ технологій. Експериментальні дослідження підтвердили коректну роботу мережі при отриманні даних із акселерометра та датчика Холла. На підставі даних акселерометра було розраховано максимальну вихідну напругу в діапазоні робочих частот — 3,9 В, що дозволяє оператору оцінювати стан коробки: при

перевищенні 4 В можна судити про можливі несправності. Експериментальні дані датчика Холла дозволили визначити залежність вихідної напруги повітряного зазору. Крім того, було встановлено зв'язок температури обмотки генератора з опором, що дозволяє оператору коректно інтерпретувати значення вихідних електричних сигналів та зіставляти їх із фізичним станом конструкції вітрогенератора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк , Ф. Шкрабець , Н. Нойбергер , Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац . гірн . ун-т. - Д.: НГУ, 2015. - 335 с
2. Тарасенко М.Г. Методичні вказівки до практичних робіт з курсу «Відновлювані джерела енергії». Методичні вказівки / Тарасенко М.Г. Гетьманюк В.І. – Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя , 2012. – 65 с
3. . Дудюк , Д. Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та завдання: навч . посіб / Д. Л. Дудюк , С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин . - Львів : “ Магнолія 2006”, 2009. - 188 с
4. US Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook 2016, Report Number: fmkfybnlfDOE /EIA-0484(2016).
5. BP Energy Outlook 2035: January 2017. <http://www.bp.com/energyoutlook>
6. Lefevre M., Independant Consultant on Energy Security issues and PetroleumGeology , Hydrocarbons falling prices: A danger for European energy security? "Tribune", 2016.
7. Danilov IA, Історія 1150kV overhead line. [Електронний ресурс]. - URL: <https://sites.google.com/site/zapiskinepublicista/ia-danilov-istoria-vl-1150-kv> (переглянуто: 06.12.2021)
8. Timmons D., Harris JM, Roach B., Economics of Renewable Energy, Global Development and Environment Institute, Tufts University, Medford 2014.
9. Alternative Energy Tutorials, Photovoltaic Solar Cells, 2017.
10. Modern wind power generation методів. Efficiency, expediency, Electronic Educational Portal, 2012.
11. Quaschnig V., Understanding Renewable Energy System”, London, Sterling, VA , 2005.
12. Kagel A., State of Geothermal Technology, Geothermal Energy Association

209 Pennsylvania Avenue SE. Washington, DC; 2009.

13. CADDET Center для Renewable Energy, Installation of Biomass- fuelled Boiler at Coal-fired CHP Plant, Oxfordshire , Великобританія.

14. Carrasco JL, Pain A., Spuhler D., Hydropower (Small-scale), SSWM, 2012.

15. Food and Agriculture Organization of United Nation, AQUASTAT countryprofile , 2012.

16. Tan K, Islam S (2004) Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors. IEEE Transactions on Energy Conversion 19(2): 392-399.

17. Camblong H, Martinez de Alegria I, Rodriguez M, Abad G (2006) Experimental evaluation wind turbines maximum power point tracking controllers. Energy Conversion and Management 47(18-19): 2846-2858.

18. Munteanu I, Guiraud J, Roye D, Bacha S, Bratcu AI (2006) Використовуючи режим енергетичної надійності optimization of variable speed wind power system. В: Процедури 9th IEEE Workshop on Variable Structure Systems - VSS '06, pp. 92-97.

19. Narendra KS, Balakrishnan J (1997) Adaptive control using multiple models. IEEE Transactions on Automatic Control 42(2): 171-187.

20. Iulean Munteanu, Antoneta I. Bratcu . olution : Optimal Control of Wind Energy Systems. Towards a Global Approach . – Springer. – 2008. – 245 p.

21. Rabelo B, Hofmann W (2003) Управління оптимізованим напругою в wind енергетичних системах з досконало-генерованими індукціями. IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference - PESC 2003, 4: 1563-1568

22. Parfit M, Leen S (2005) Energy of the future (Energia viitorului). National Geographic 8: 32-57.

23. NT-T. Vu. Роботний швидкий контроль методу для permanent magnet synchronous motor/Vu NT-T, HH Choi, R.-Y. Kim, J.-W. Jung // IET Electr . Power Appl ., 2012, Vol . 6. pp . 399-411

24. Zhang H, Lin J, Zhang B, Jiang Y, Sun H, Wu B Fault detection and diagnosis для wind turbine gearbox заснований на невиконаних multifeature fusion метод. Renewable Energy, 2014, Vol . 62, pp. 311-323.

25. Zhang Y, Dai Y, Zhao W. Review on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2017, Vol . 75, pp . 614-626.

26. Li J, Huang B, Zhou Y, Zhou Z, Sun Y, Fang Z Review of wind turbine condition monitoring methods and emerging technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2017, Vol . 94, pp . 536-551.

27. Qiu H, Jiang Y, Zhang H, Zhang B, Yu M, Sun H, Wind turbine gearbox fault diagnosis базується на multisensor fusion and deep belief network. Renewable Energy, 2018, Vol.133, pp . 719-730.

ДОДАТОК

Графічний матеріал

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М.БЕКЕТОВА

*Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури*
Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Система керування режимами роботи вітрогенератора потужністю 300 кВт

Виконав: студент 3 курсу,
групи НВДЕ-2023у
М. К. Попов

Керівник: доц. О.Б. Єгоров

Цілі та завдання проєктування

1. Метою даної роботи є розробка двох моделей системи автоматизованого керування положенням лопатей вертикально-осьових багатолопатевих вітрогенераторів.
2. Розробити метод прогнозування вихідної потужності вітрогенератора та систему дистанційного моніторингу його стану.
3. Проаналізувати шкідливі та небезпечні виробничі фактори, з якими може зіткнутися ремонтний та обслуговуючий персонал вітрогенератора

Алгоритми роботи блоків керування вітроустановок

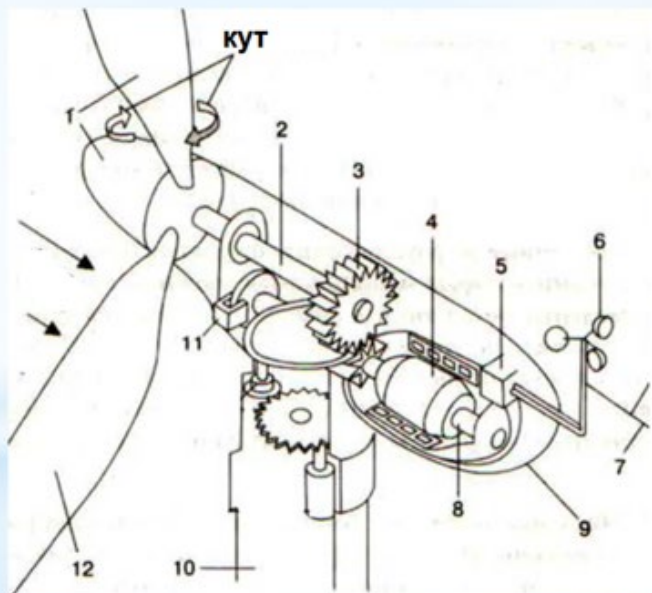
Метод керування вихідною потужністю вітрогенератора при постійній частоті обертання.

Метод керування вихідною потужністю шляхом ступінчастої зміни частоти обертання

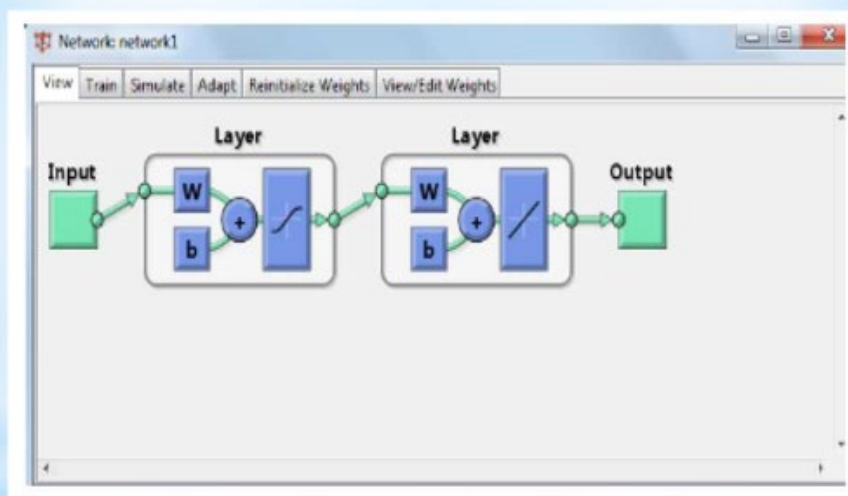
Метод керування вихідною потужністю при змінній частоті обертання

Метод зміни кута атаки на лопатях

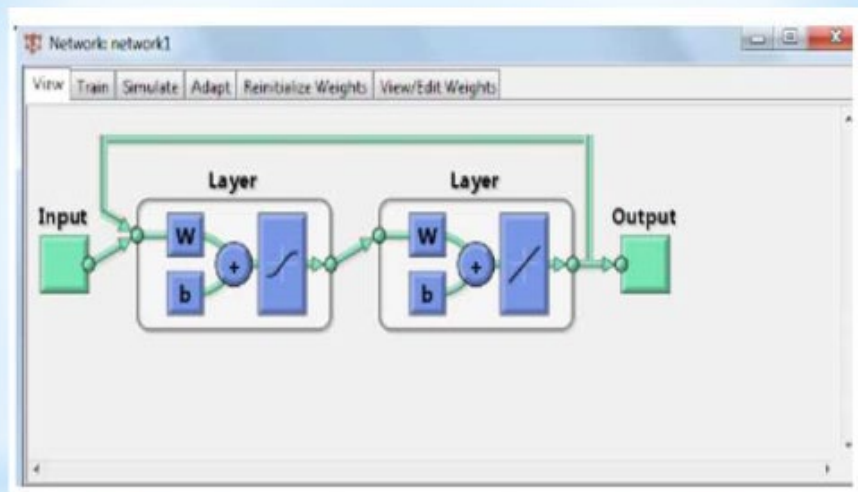
Конструктивна схема вітроустановки



Прогноз вихідної потужності вітрогенератора

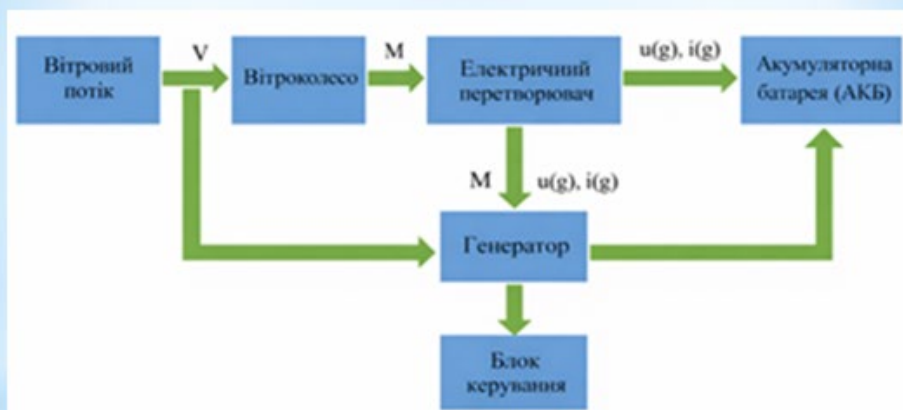


Загальна схема штучної нейронної мережі прямого поширення даних та зворотного поширення помилки



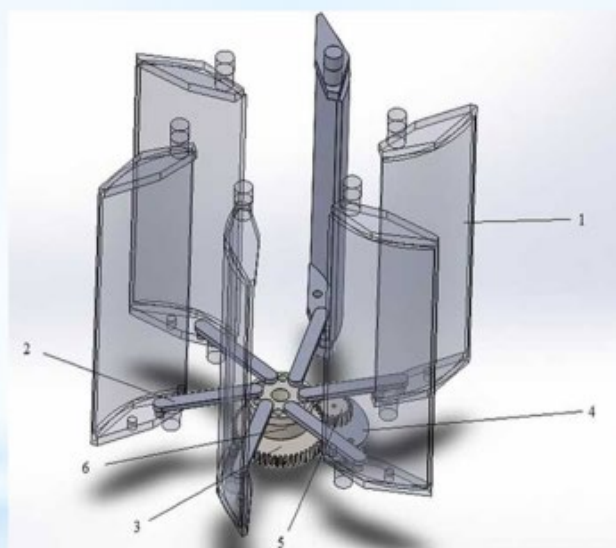
Доопрацьована схема штучної нейронної мережі із зворотним зв'язком

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРАМИ



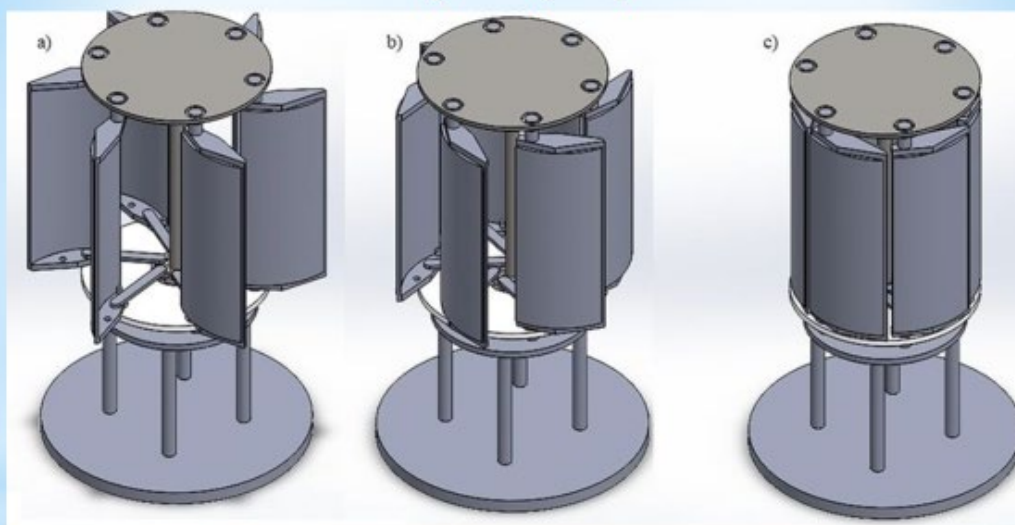
Загальна функціональна схема вітрогенератора з використанням блоку управління

Важільна система управління



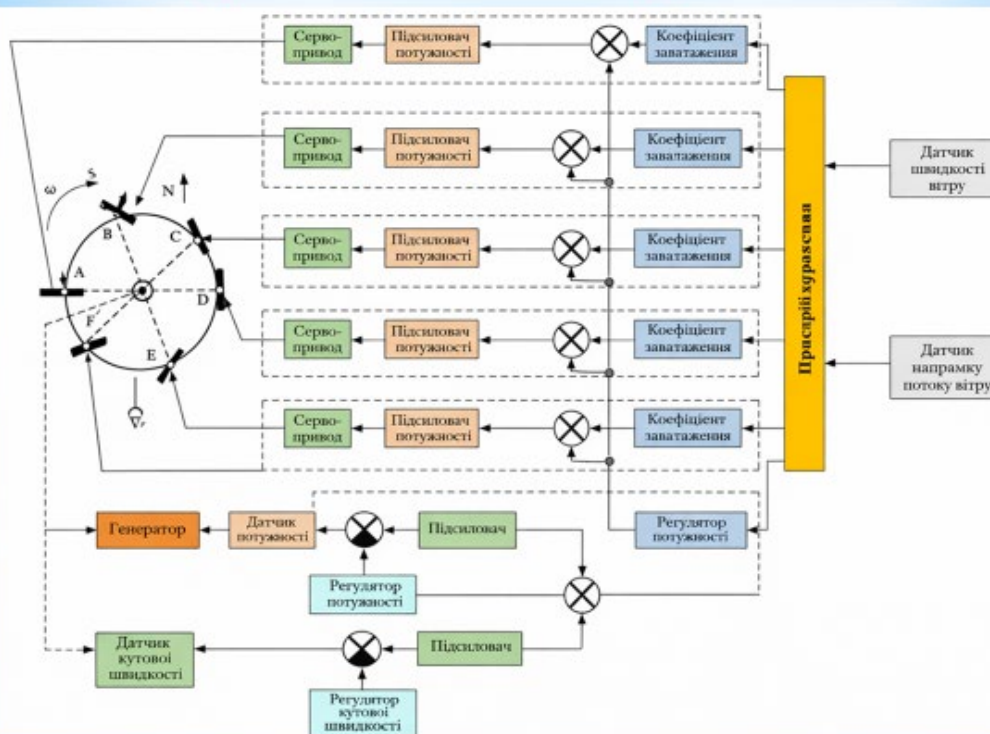
Важільна система управління: 1-лопаті, 2 - важіль, 3 - зубчасте колесо велике, 4 - кроковий двигун, 5 - мала шестерня, 6 - диск

Режими управління положенням лопатей вітрогенератора



а) - нормальний режим роботи вітрогенератора, у якому система управління не активована; б) - регулювання положення лопат при швидкості вітру вище 25 м / с; в) - аварійний режим, за якого вітрогенератор не виробляє електроенергію

Загальна функціональна схема управління лопатями



Висновки по роботі

1. З аналізу різних методів управління вітрогенераторами було обрано оптимальний спосіб - управління кутом атаки лопатей. Цей метод дозволяє ефективно контролювати роботу вітрогенератора при критичних швидкостях вітру та максимально використовувати енергію вітрового потоку.
2. Була створена програма мовою Python для отримання прогнозу швидкості вітру із сайту Accuweather. На основі цих даних було розраховано прогноз вихідної потужності вітрогенератора.
3. Було розроблено та досліджено систему управління положенням лопатей вертикально-осьового вітрогенератора.
4. Проаналізовані питання охорони праці при експлуатації вертикально-осьового вітрогенератора.