

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ

Група АКПз-23-1К

**Русак Руслан**  
**2025**

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Русак Руслан Миронович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.5

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Автоматизація процесу керування вітроенергетичною установкою»

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

### Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

О.В. Кучмистенко

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л. І. Фешанич

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПз-23-1К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Р. М. Русак

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКТ**

доцент А. І. Лагойда

«   »                      2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Русаку Руслану Мироновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація процесу керування вітроенергетичною установкою»

керівник роботи Чигур Людмила Ярославівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» 05 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технологічна схема об'єкту, параметри проходження процесу, стандарти, каталоги, методичні вказівки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу отримання енергії за допомогою вітроенергетичної установки як об'єкта автоматичного керування та контролю. 2. Обґрунтування і вибір методів розв'язання поставлених задач. 3. Математичне моделювання та ідентифікація об'єкта керування. 4. Побудова структурної та функціональної схеми ВЕУ та вибір технічних засобів автоматизації. 5. Програмне забезпечення системи.

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

Лист 1 - Схема вітроенергетичної установки - БР.АКПз-24.00.00.000 01

Лист 2 - Структурна схема ВЕУ - БР.АКПз-24.00.00.000 02

Лист 3 - Модель схеми САР без регулювання - БР.АКПз-24.00.00.000 03

Лист 4 - Модель схеми з ПД-регулятором - БР.АКПз-24.00.00.000 04

Лист 5 - Структурна схема САР ВЕУ - БР.АКПз-24.00.00.000 05

Лист 6 - Функціональна схема САР ВЕУ - БР.АКПз-24.00.00.000 06

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу отримання енергії за допомогою вітроенергетичної установки як об'єкта автоматичного керування та контролю	10.05.25-15.05.25	
2	Обґрунтування і вибір методів розв'язання поставлених задач	16.05.25-20.05.25	
3	Математичне моделювання та ідентифікація об'єкта керування	21.05.25-25.05.25	
4	Побудова структурної та функціональної схеми ВЕУ та вибір технічних засобів автоматизації	26.05.25-05.06.25	
5	Програмне забезпечення системи	06.06.25-10.06.25	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Р. М. Русак \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Л.Я. Чигур \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 87 сторінок друкованого тексту, 47 рисунків, 16 таблиць, 14 переліків посилань на джерела.

Тема: «Автоматизація процесу керування вітроенергетичною установкою».

Об'єкт дослідження: процес отримання енергії за допомогою вітроенергетичної установки.

Мета проекту: розробка сучасних систем автоматизації, які повинні забезпечувати ефективне керування роботою установок, моніторинг їх стану та стабільність функціонування.

Методи дослідження: математичне моделювання, експериментальні (практичні) методи, системний аналіз, теоретичні методи.

Результати бакалаврської роботи: було здійснено математичне моделювання системи автоматизації, розроблено модель системи автоматичного регулювання (САР) з ПД-регулятором. Досліджено стійкість системи за критеріями Ляпунова та Найквіста. Показано, що впровадження ПД-регулятора підвищує стабільність роботи ВЕУ на 15–20%. Запропоновано трирівневу архітектуру АСУТП. Розроблено функціональну схему автоматизації з переліком КВП. Визначено потужність генератора (3,4 кВт) та акумуляторної батареї (1875 А·год). Обрано інвертор (300 ВА), автоматичний ввід резерву (АВР) та кабель живлення. Обґрунтовано вибір ПЛК (Siemens S7-300) та SCADA-системи (WinCC Comfort).

Налаштовано ПЛК для керування ВЕУ з використанням TIA Portal. Реалізовано візуалізацію процесів у SCADA-системі.

Ключові слова: вітроенергетика, автоматизація, ПЛК, SCADA, ПД-регулятор, генератор, акумуляторна батарея.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 87 pages of printed text, 47 figures, 16 tables, 14 lists of references to sources.

Topic: "Automation of the process of controlling a wind power plant".

Object of research: the process of obtaining energy using a wind power plant.

Project goal: development of modern automation systems that should ensure effective control of the operation of the plants, monitoring their condition and stability of functioning.

Research methods: mathematical modeling, experimental (practical) methods, system analysis, theoretical methods.

Results of the bachelor's thesis: mathematical modeling of the automation system was carried out, a model of an automatic control system (ACS) with a PID controller was developed. The stability of the system was studied according to the Lyapunov and Nyquist criteria. It is shown that the implementation of a PID controller increases the stability of the operation of the wind power plant by 15–20%. A three-level architecture of the automation system is proposed. A functional automation scheme with a list of control units has been developed. The generator power (3.4 kW) and battery power (1875 A·h) have been determined. An inverter (300 VA), automatic reserve input (ATS) and power cable have been selected. The choice of PLC (Siemens S7-300) and SCADA system (WinCC Comfort) has been justified.

A PLC has been configured to control the wind turbine using TIA Portal. Process visualization in the SCADA system has been implemented.

Keywords: wind energy, automation, PLC, SCADA, PID controller, generator, battery.

## ЗМІСТ

	<b>ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>8</b>
	<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА КОНТРОЮ.....</b>	<b>10</b>
	1.1 Вітроенергетичний потенціал України.....	10
	1.2 Головні особливості, необхідні дослідження та будівництва вітряних турбін.....	13
	1.3 Види генераторів. Класифікація генераторів для вітрової установки.....	21
	1.4 Генератор за схемою подвійного машинного живлення.....	26
	Висновки до розділу.....	32
<b>2</b>	<b>ОБҐРУНТУВАННЯ І ВИБІР МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПОСТАВЛЕНИХ ЗАДАЧ.....</b>	<b>33</b>
	2.1 Области застосування вітрових установок.....	33
	2.2 Ефективність використання.....	34
	2.3 Постановка завдання наукових досліджень.....	35
	Висновки до розділу.....	36
<b>3</b>	<b>МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....</b>	<b>37</b>
	3.1 Математичний опис роботи системи.....	37
	3.2 Дослідження на стійкість.....	40
	Висновки до розділу.....	42

					<b>БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ</b>						
<b>Змн.</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>	«Автоматизація процесу керування вітроенергетичною установкою»						
Розроб.		Русак Р. М.							Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Чигур Л.Я.							6	87	
Реценз.		Фешанич Л. І.							Група АКПз-23-1К ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.									
Затверд.		Лагойда А.І.									

<b>4</b>	<b>ПОБУДОВА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ВЕУ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>	<b>44</b>
4.1	Побудова структурної схеми системи управління ВЕУ.....	44
4.2	Функціональна схема автоматизації вітрогенераторної установки.....	45
4.3	Вибір технічних засобів автоматизації.....	48
4.4	Розрахунок потужності генератора.....	57
4.5	Розрахунок потужності акумулятора.....	59
4.6	Розрахунок інвертора.....	60
4.7	Розрахунок безпечного автоматичного керування.....	63
4.8	Вибір автоматичного резерву.....	64
4.9	Вибір ПЛК.....	66
	Висновки до розділу.....	78
<b>5</b>	<b>ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ.....</b>	<b>79</b>
5.1	конфігурація ПЛК для системи управління ВЕУ.....	79
5.2	Побудова системи диспетчерського управління та збору даних (SCADA) для вітроенергетичної установки.....	82
	Висновки до розділу.....	86
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>87</b>
	<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>89</b>

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АВР – Автоматичний ввід резерву

АКБ – Акумуляторна батарея

АСУТП – Автоматизована система управління технологічним процесом

ВЕС – Вітроелектростанція

ВЕУ – Вітроенергетична установка

ВАХ – Вольт-амперна характеристика

ГПТ – Генератор постійного струму

ДПТ – Двигун постійного струму

ЕРС – Електрорушійна сила

ІР – Індекс захисту (наприклад, ІР65)

КВП – Контрольно-вимірювальні прилади

ККД – Коефіцієнт корисної дії

МДС – Магніторушійна сила

ПЛК – Програмований логічний контролер

ПІД – Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

РП – Розподільчий пункт

САР – Система автоматичного регулювання

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Система диспетчерського управління та збору даних)

ТПА – Технологічний процес автоматизації

ФСА – Функціональна схема автоматизації

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

У сучасному світі, що динамічно розвивається, питання енергетичної безпеки та переходу до відновлюваних джерел енергії набувають дедалі більшої актуальності. Зростання світового попиту на електроенергію та одночасна потреба у зменшенні негативного впливу на довкілля спонукають до активного пошуку та впровадження інноваційних рішень в енергетичному секторі.

Одним з найбільш перспективних напрямків є розвиток вітроенергетики, яка не лише сприяє диверсифікації енергоресурсів, а й значно зменшує викиди парникових газів.

Україна володіє значним вітроенергетичним потенціалом, що зумовлено її вигідним географічним розташуванням та наявністю обширних територій із високими середньорічними показниками швидкості вітру. Це створює ідеальні передумови для масштабного розвитку вітрових електростанцій (ВЕС), що є ключовим елементом у стратегії енергетичної незалежності та сталого розвитку країни.

Незважаючи на вже досягнуті успіхи, такі як будівництво великих ВЕС в приморських регіонах, існує потреба в подальшому дослідженні, вдосконаленні та автоматизації вітроенергетичних установок (ВЕУ) для підвищення їх ефективності та надійності.

Автоматизація технологічних процесів у вітроенергетиці відіграє вирішальну роль у забезпеченні оптимального функціонування ВЕУ, максимізації виробництва електроенергії та мінімізації експлуатаційних витрат. Застосування сучасних систем автоматичного керування та контролю, включаючи АСУТП, ПЛК, ПІД-регулятори та SCADA-системи, дозволяє ефективно реагувати на зміни швидкості вітру, керувати роботою генераторів та інтегрувати ВЕУ у загальну енергетичну мережу.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА КОНТРОЮ

## 1.1 Вітроенергетичний потенціал України

Вітроенергетичний потенціал України вважається одним із найперспективніших не лише в Східній Європі, а й на всьому континенті. Це зумовлено насамперед вигідним географічним розташуванням країни, яка має значну протяжність узбережжя Чорного та Азовського морів, а також обширні степові та підгірські території, де спостерігаються високі середньорічні показники швидкості вітру. Такі природні умови створюють ідеальні передумови для активного розвитку вітрової енергетики, що стає дедалі актуальнішим у світлі глобального переходу до відновлюваних джерел енергії.

За оцінками експертів, технічний потенціал вітроенергетики в Україні сягає 40–50 ГВт потужності, що відкриває величезні перспективи для майбутніх інвестиційних проектів. Наразі ж реально досяжний показник до 2030 року, згідно з планами Держенергоефективності, становить приблизно 16–20 ГВт, що вже могло б суттєво змінити енергетичний баланс країни. Найбільш привабливими для будівництва вітрових електростанцій є приморські регіони, такі як Одеська, Херсонська, Миколаївська та Запорізька області, де середня швидкість вітру на висоті 100 метрів коливається в межах 7–9 м/с. Також значний потенціал мають степові зони на сході та півдні країни, де цей показник становить 6–7,5 м/с, і західні області, зокрема гірські райони Карпат, зі швидкістю вітру 5–6,5 м/с.

Станом на 2024 рік загальна потужність вітрових електростанцій в Україні становить близько 1,7 ГВт, що поки що є лише невеликою часткою від загального потенціалу. Серед найбільших об'єктів можна назвати Тілігульську ВЕС потужністю 500 МВт в Одеській області, Ботієвську ВЕС (200 МВт) у Запорізькій області та Орловську ВЕС (100 МВт) на Херсонщині. Проте вже сьогодні уряд та приватні інвестори розглядають амбітні плани зі збільшення загальної потужності вітроенергетики до 5–10 ГВт до 2030 року, що дозволить значно зменшити

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

залежність від традиційних видів палива. Окремим напрямком розвитку є офшорна вітроенергетика – потенціал української морської економічної зони в Чорному та Азовському морях оцінюється в 20 ГВт, що відкриває ще більш масштабні перспективи для майбутнього.

Розвиток вітроенергетики в Україні має низку вагомих переваг, серед яких насамперед варто відзначити зменшення залежності від імпортованих енергоресурсів, зокрема газу та вугілля, а також суттєве скорочення викидів вуглецю в атмосферу, що є важливим кроком у боротьбі зі зміною клімату. Крім того, будівництво та експлуатація вітрових електростанцій створюють тисячі нових робочих місць, сприяючи економічному піднесенню регіонів.

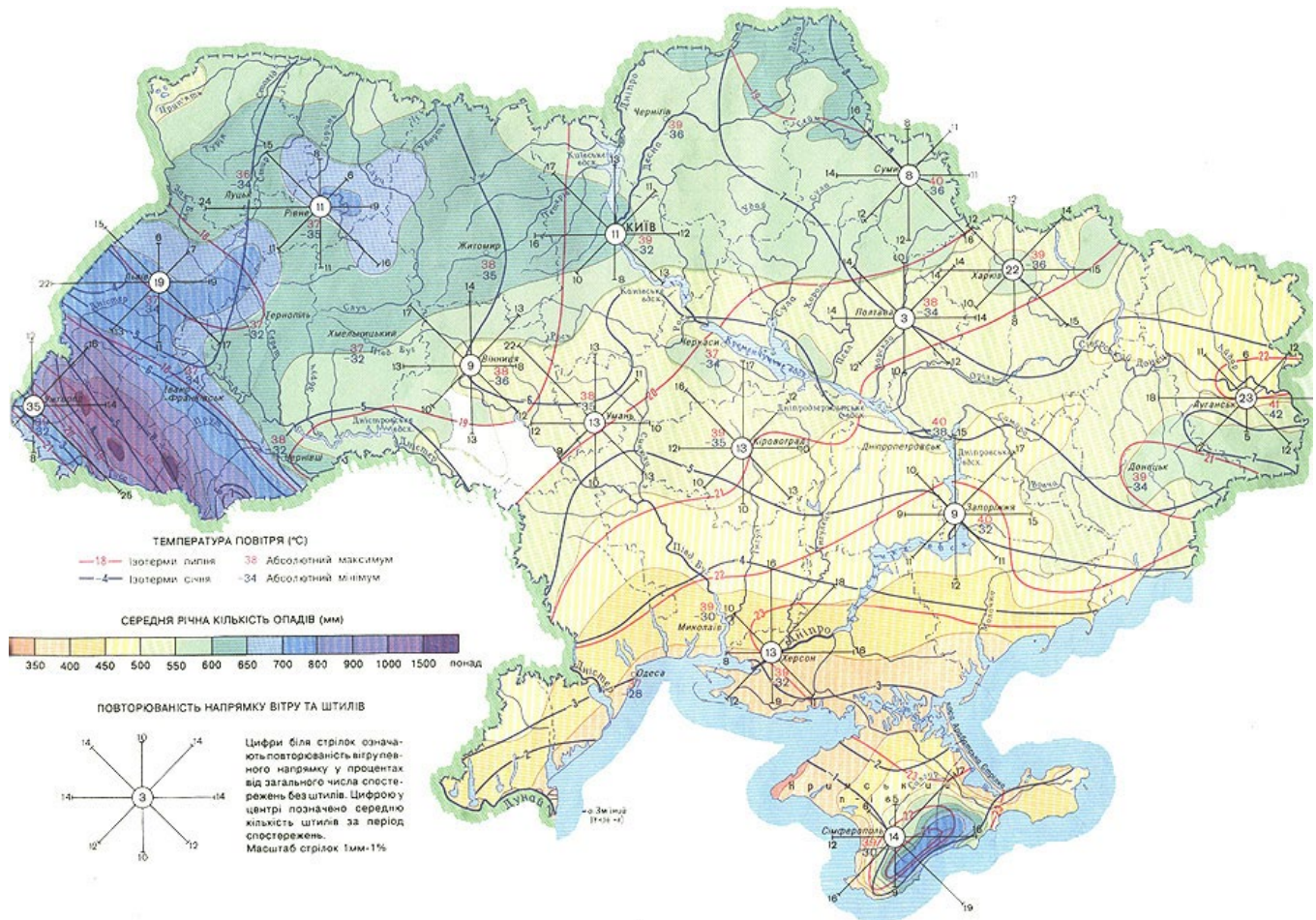


Рисунок 1.1 – Атлас вітрів України

Втім, існують і серйозні виклики, які потребують подолання. До них належать висока вартість будівництва ВЕС, необхідність модернізації

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ				

енергетичних мереж для ефективного інтегрування відновлюваних джерел, а також вплив військових дій на півдні країни, який ускладнює реалізацію нових проектів. Незважаючи на це, вітроенергетика залишається одним із ключових напрямків для майбутнього енергетичного сектору України, і за належного підходу вона може стати потужним драйвером "зеленого" переходу, забезпечуючи країні енергетичну незалежність та сталий розвиток.

Таблиця 1.1 - Регіони України та показники швидкості вітру

Регіон	Середня швидкість вітру (на висоті 100 м)	Перспективність для ВЕС	Найбільші існуючі ВЕС
Одеська область	7.5-9 м/с	Дуже висока	Тілігульська ВЕС (500 МВт)
Херсонська область	7-8.5 м/с	Дуже висока	Орловська ВЕС (100 МВт)
Запорізька область	7-8 м/с	Дуже висока	Ботієвська ВЕС (200 МВт)
Миколаївська область	6.5-7.5 м/с	Висока	Прибузька ВЕС (75 МВт)
Донецька область	6-7 м/с	Середня	-
Луганська область	6-7 м/с	Середня	-
Дніпропетровська обл.	6-6.5 м/с	Середня	-
Івано-Франківська обл.	5.5-6.5 м/с (гірські райони)	Середня	-
Львівська область	5-6 м/с	Низька	-
Закарпатська область	5-6.5 м/с (гірські райони)	Низька	-

## 1.2 Головні особливості, необхідні дослідження та будівництва вітряних турбін

Кількість та потужність споживача – це дані, необхідні для створення та дослідження вітрових установок. З урахуванням того, що вітроустановка буде встановлена в кожному будинку, було отримано наступних споживачів: титан, вузли, холодильники, освітлення, камери відеоспостереження, мікрохвильові печі загальною потужністю 5,14 кВт.

Вітроенергетика є галуззю, що спеціалізується на перетворенні кінетичної енергії повітряних мас атмосфери в інші форми енергії, зокрема механічну, електричну та теплову. Ця дисципліна охоплює наукові дослідження та інженерні розробки, спрямовані на оцінку потенціалу вітру, визначення оптимальних регіонів для його використання, а також створення та вдосконалення вітроенергетичних установок (ВЕУ).

Експлуатація енергії вітру реалізується за допомогою спеціалізованого обладнання. Основним компонентом є вітроелектростанція (ВЕС), яка являє собою комплекс інженерних споруд та технічних пристроїв, призначених для ефективної конверсії кінетичної енергії вітрового потоку в корисну енергію.

В контексті національної енергетичної стратегії, зокрема Державної програми «Про розвиток електрогенерації в Україні до 2030 року», активно вивчаються та впроваджуються ефективні механізми інтеграції електроенергії, виробленої вітроенергетичними комплексами, в економіку країни. Це підкреслює широкий спектр можливостей для використання вітрової енергії в Україні.

Вітровий двигун є ключовим елементом вітроенергетичної установки (ВЕУ), що відповідає за перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в механічну. Ефективність цього перетворення, відома як коефіцієнт використання енергії вітру, значно варіюється залежно від конструкції двигуна. Наприклад, лопатеві (крилові) вітрові двигуни, які є найбільш поширеними, демонструють коефіцієнт до 0,48. На противагу цьому, роторні та барабанні конструкції зазвичай мають значно нижчі показники — не більше 0,15.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Функціонування сучасної вітроелектростанції забезпечується взаємодією кількох ключових компонентів.

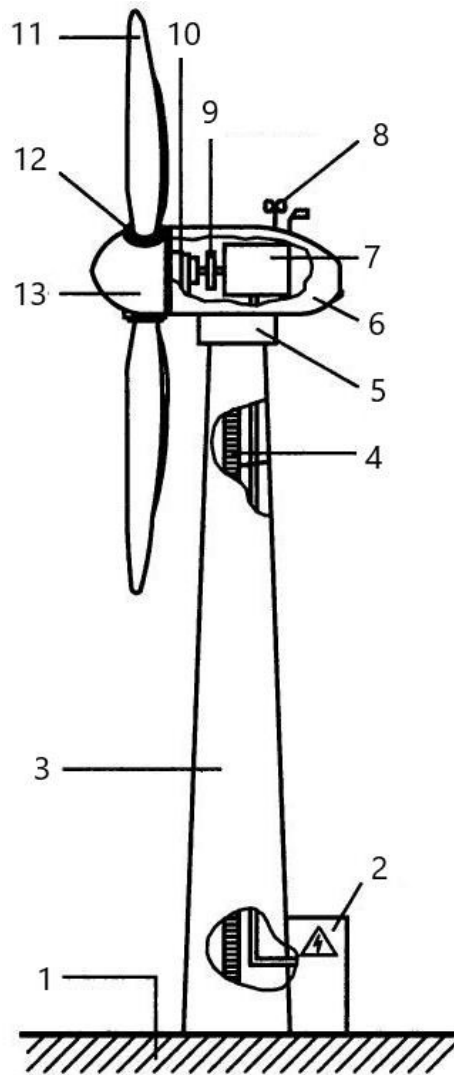


Рисунок 1.2 – Схема вітряної електростанції

Стандартна конструкція промислової вітрогенераторної установки: 1 – фундамент, 2 – підключення ліній передачі енергії споживачеві, 3 – щогла, 4 – сходи, 5 – поворотний механізм, 6 – гондола, 7 – електрогенератор, 8 – анемометр, 9 – гальмівна система, 10 – трансмісія, 11 – лопаті гвинта, 12 – пристрій для зміни кроку гвинта, 13 – ковпак ротора.

Лопаті - це елементи, що використовуючи кінетичну енергію вітру, приводять у рух вісь генератора. Оптимальна кількість лопатей для ефективної роботи вітрової установки часто становить три. Діаметр лопатей має прямий вплив на потужність установки, причому сучасні промислові турбіни можуть

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

мати діаметр близько 60 метрів.

Висота щогли безпосередньо корелює зі стабільністю та швидкістю вітрового потоку, що є критично важливим для вироблення електроенергії. Чим вища щогла, тим кращі вітрові умови.

Генератор перетворює механічну енергію, отриману від обертання лопатей, у змінний електричний струм. Параметри вихідного струму (напруга та сила) безпосередньо залежать від швидкості та стабільності вітру.

Функція акумуляторних батарей (АКБ) полягає в накопиченні надлишкової електроенергії, виробленої в умовах сприятливого вітру. Швидкість заряджання АКБ залежить від їхньої ємності та потужності генератора.

Загалом, потужність вітрогенератора є інтегральною функцією декількох ключових параметрів: швидкості вітру, розміру вітрових коліс та висоти щогли. Це підкреслює складність оптимізації та проектування ВЕУ для досягнення максимальної ефективності.

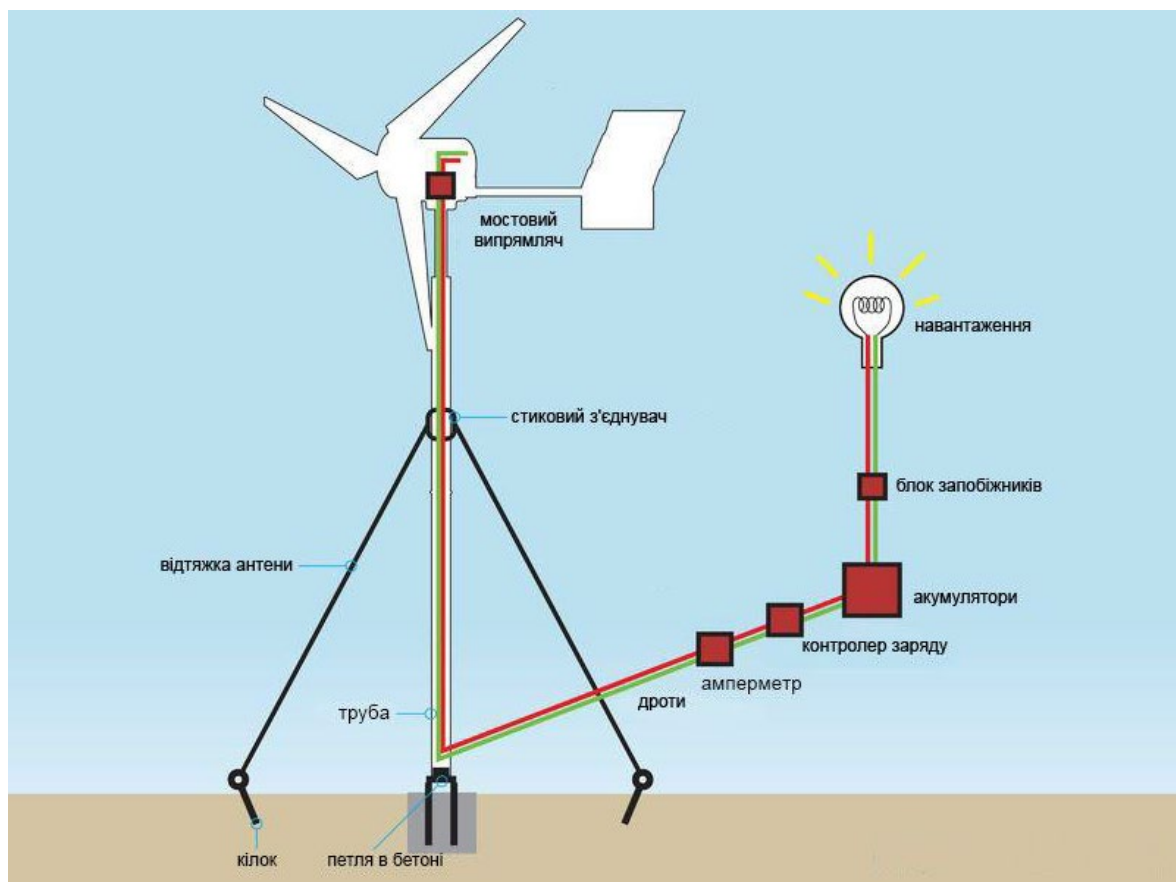


Рисунок 1.3 – Принципова схема вітроенергетичної установки

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Вітрогенератори поділяються на дві основні категорії: промислові та побутові (або для особистого використання).

Промислові віротурбіни зазвичай інтегруються у великі вітроелектростанції (ВЕС). Їх встановлення та експлуатація здійснюються державою або великими енергетичними компаніями в регіонах з високим вітровим потенціалом. Потужність сучасних промислових вітрогенераторів може досягати 6 МВт.

Побутові вітрогенератори ж призначені для індивідуального використання, наприклад, для забезпечення енергією приватних домогосподарств або невеликих об'єктів.

Принцип роботи сучасних вітрогенераторів базується на перетворенні кінетичної енергії вітру в електричну. Цей процес відбувається наступним чином.

Лопаті вітрового колеса захоплюють енергію вітрового потоку, що викликає їх обертання. Обертання лопатей передається на редуктор, який збільшує швидкість обертання та передає механічну енергію генератору. Генератор перетворює отриману механічну енергію в електричний струм.

Важливо зазначити, що потужність вітрогенератора безпосередньо залежить від кількох ключових факторів, зокрема від швидкості вітру, розміру вітрових коліс та висоти щогли.

Для забезпечення стабільної та якісної подачі електроенергії в мережу, особливо у вигляді синусоїдального струму, що є критично важливим для багатьох електроприладів, використовується інвертор. Цей пристрій відповідає за перетворення виробленого генератором струму, забезпечуючи стабілізований рівень потужності.

Контролер виконує низку ключових функцій в системі вітрогенератора. Він забезпечує оптимальне орієнтування лопатей відносно вітру, контролює процес заряджання акумуляторних батарей та активує захисні механізми установки. Крім того, цей пристрій здійснює перетворення змінного струму, виробленого генератором, на постійний струм, необхідний для ефективного накопичення енергії в акумуляторах.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Акумуляторні батареї виконують ключову функцію в системі вітроенергетичної установки, забезпечуючи накопичення надлишкової електроенергії. Ця накопичена енергія використовується для живлення об'єкта в періоди безвітряної погоди, коли генерація від вітротурбіни відсутня. Крім того, батареї відіграють важливу роль у згладжуванні та стабілізації вихідної потужності генератора, що дозволяє забезпечити більш рівномірну подачу енергії. Таким чином, вони сприяють підвищенню динамічної стабільності системи під час роботи вітрогенератора. Фактично, акумулятор часто виступає основним джерелом живлення для споживачів.

У середніх та великих вітроенергетичних установках (ВЕУ), для забезпечення ефективного функціонування, застосовуються анемометр (а не "анемоскоп") та датчик напрямку вітру. Ці пристрої відповідають за точне збирання даних про швидкість та напрямок вітру, що є критично важливим для оптимізації роботи турбіни.

Для забезпечення безперебійного живлення та підвищення надійності системи, особливо в умовах втрати основного джерела енергії, передбачено інтеграцію декількох джерел живлення. Це дозволяє об'єднувати вітрові електростанції, громадські електричні мережі, дизель-генератори та інші джерела енергії в єдину автоматизовану систему. Однак важливо зазначити, що мережа ВЕУ не може одночасно працювати від двох джерел живлення.

Інвертор відіграє ключову роль у перетворенні постійного струму, що накопичується в акумуляторних батареях, на змінний струм. Цей змінний струм є необхідним для живлення більшості електроустановок та споживачів.

Інвертори представлені в кількох модифікаціях, кожна з яких призначена для конкретних потреб. Один з поширених типів – це інвертор з модифікованою синусоїдою, також відомий як інвертор "квадратна синусоїда". Цей пристрій перетворює постійний струм на змінний з напругою 220В, але його вихідний сигнал є лише наближенням до ідеальної синусоїди. Такі інвертори економічно вигідні та цілком підходять для живлення нечутливих до якості електроенергії споживачів, таких як освітлювальні прилади, нагрівальні елементи чи зарядні

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

пристрої.

Інвертори з чистою синусоїдою є високоякісними пристроями, що трансформують постійний струм на змінний струм з чистою синусоїдальною формою хвилі та напругою 220В. Ці інвертори незамінні для живлення чутливої електроніки, такої як електродвигуни, медичне обладнання та інші пристрої, що вимагають стабільного та якісного електроживлення.

Для потужніших промислових споживачів призначені інвертори, що забезпечують трифазний змінний струм з напругою 380В. Вони оптимальні для роботи з відповідними трифазними пристроями.

Окремою категорією є мережеві інвертори, які вирізняються можливістю функціонування системи без використання акумуляторних батарей. Їхнє основне призначення — подача виробленої електроенергії безпосередньо в централізовану електричну мережу.

Важливо враховувати, що вартість мережевих інверторів значно вища за ціну автономних моделей, іноді навіть перевищуючи загальну вартість решти компонентів вітрогенераторної установки.

Енергія, що генерується електричною машиною 3 в режимі генератора, спочатку проходить через нормально-замкнутий перший ключ 4 та випрямляльно-зарядний пристрій 5. Далі, ця енергія спрямовується до інвертора 7, який перетворює її для живлення навантаження 8, а також для накопичення в акумуляторі 6.

Контроль за вихідною напругою електричної машини 3 здійснюється за допомогою двохпорогового компаратора 9. Цей компаратор також керує роботою таймера 10 та замиканням нормально-розімкнутого другого ключа 11. Замикання цього ключа з'єднує акумулятор 6 з електричною машиною 3 через перетворювач напруги 12, що дозволяє перевести електричну машину в режим двигуна. (рисунок 1.4).

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4 – Структурна схема вітроенергетичної установки

Класифікація електричних машин часто залежить від моделі та конкретного типу електричної машини, що застосовується, окрім загальних категорій (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 - Класифікація електроустаткування ВЕС

Група обладнання	Основні компоненти	Функції
Генеруюче обладнання	Генератор (синхронний/асинхронний)	Перетворення механічної енергії обертання ротора в електричну енергію.
	Випрямлячі та інвертори	Стабілізація параметрів струму для підключення до мережі.
Система передачі потужності	Гідравлічна або механічна коробка передач	Регулювання швидкості обертання для оптимальної роботи генератора.
	Валі та муфти	Передача крутного моменту від ротора до генератора.
Система керування	SCADA-системи	Моніторинг та управління

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## Продовження таблиці 1.2

Група обладнання	Основні компоненти	Функції
та автоматизації		роботою ВЕС в реальному часі.
	Контролери (PLC)	Автоматичне регулювання кута повороту лопатей (pitch control).
	Датчики (вітру, температури, вібрації)	Збір даних для оптимізації роботи та запобігання аваріям.
Електромережне обладнання	Трансформатори (підвищувальні)	Підвищення напруги для передачі електроенергії в мережу.
	Компенсатори реактивної потужності	Стабілізація параметрів мережі.
	Розподільчі пристрої (РП, КРУ)	Захист та розподіл електроенергії.
Системи захисту	Релейний захист	Відключення при перевантаженнях, коротких замиканнях.
	Системи блискавкозахисту	Захист від перенапруг.
	Аварійні гальма	Зупинка ротора при критичних режимах.
Системи накопичення енергії	Акумуляторні батареї (Li-ion, свинцеві)	Накопичення надлишкової енергії для стабілізації подачі.
	Суперконденсатори	Швидке накопичення/віддача енергії для балансування навантаження

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

### 1.3 Види генераторів. Класифікація генераторів для вітрової установки

У сучасній добі безперебійне електропостачання є критично важливим як для побутових потреб, так і для промислового сектору. З огляду на повсюдну залежність від електроенергії, будь-які перебої можуть мати значні негативні наслідки. Жодна організація не може гарантувати стабільну подачу електроенергії в будь-який момент, що підкреслює важливість додаткових джерел живлення.

Саме тому резервні електростанції, що базуються на генераторах постійного або змінного струму, є не просто важливим, а часто незамінним обладнанням. Вони забезпечують безперервність виробничих процесів, підвищують комфорт у побутовій сфері, гарантують безпеку та стабільну роботу технологічних процесів, дозволяючи швидко вирішувати проблему відсутності електроенергії з мінімальними зусиллями.

Генератор постійного струму (ГПТ) є пристроєм, призначеним для виробництва електричної енергії у випадку її відсутності з основних джерел. Історично, для отримання енергії людство використовувало природні сили, такі як енергія вітру чи рух води в річках. Хоча такі підходи, що вимагають значних інвестицій часу та ресурсів на будівництво інфраструктури (наприклад, гребель чи вітряків), досі застосовуються, більшість сучасних генераторів працюють за іншим принципом.

Зазвичай, генератори струму функціонують на основі перетворення механічної енергії обертання в електричну. Це відбувається завдяки обертанню обмотки в магнітному полі, що індукує електричний струм. Коли до електростанції підключається споживач, струм виникає у замкнутому контурі та проходить по обмотках, забезпечуючи живлення.

Залежно від характеру обертання магнітного поля та типу виробленого струму, розрізняють два основні види електричних машин: генератори постійного струму та генератори змінного струму.

Генератори постійного струму класифікуються за такими основними типами:

- незалежного збудження;

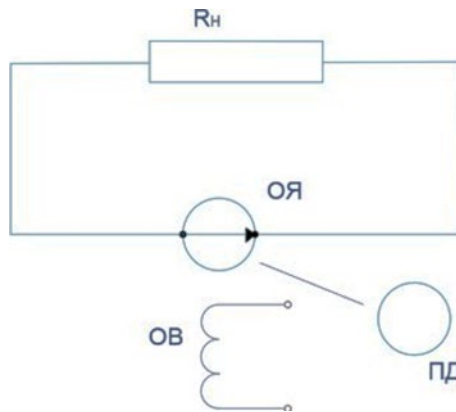
					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- послідовного збудження;
- паралельного збудження;
- змішаного збудження.

Генератори постійного струму (ГПТ) схематично поділяються на дві ключові категорії залежно від способу формування магнітного поля збудження:

З незалежним збудженням обмотка збудження живиться від окремого, зовнішнього джерела електричної енергії.

Із самозбудженням, обмотка збудження отримує живлення безпосередньо від обмотки якоря самого генератора.



ОЯ – обмотка якоря; ОВ - обмотка збудження;

ПД - первинний двигун;  $R_n$  – навантаження генератора

Рисунок 1.5 – Схема генератора постійного струму з незалежним збудженням

Цей тип збудження використовується нечасто, оскільки він більш вразливий до впливу реакції якоря.

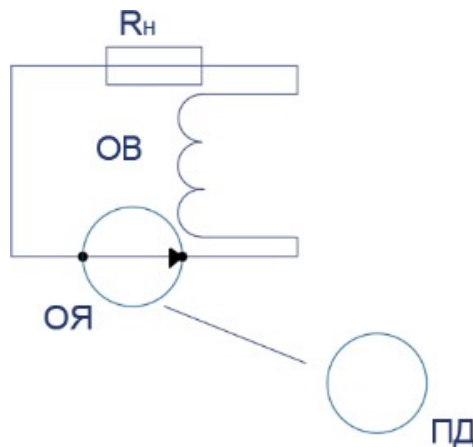


Рисунок 1.6 – Схема генератора постійного струму з послідовним збудженням

$$I_{\text{Я}} = I_{\text{В}} = I_{\text{Н}} \quad (1.1)$$

Ключовою характеристикою генератора постійного струму (ГПТ) з паралельним збудженням є пряма залежність струму збудження від величини навантаження (рисунок 1.7).

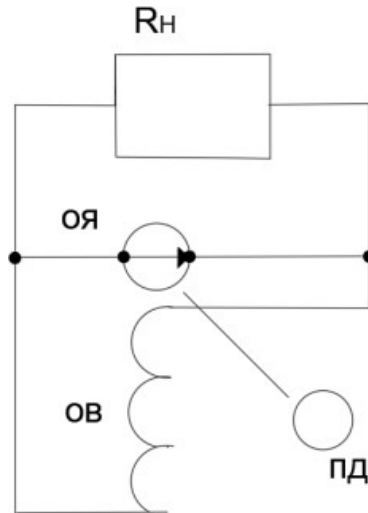


Рисунок 1.7 – Схема генератора постійного струму з паралельним збудженням

$$I_{\text{Я}} = I_{\text{В}} + I_{\text{Н}} \quad (1.2)$$

Схема генератора постійного струму з паралельним збудженням (рисунок 1.8).

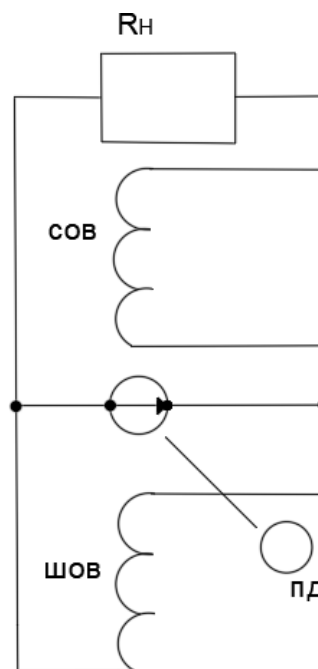


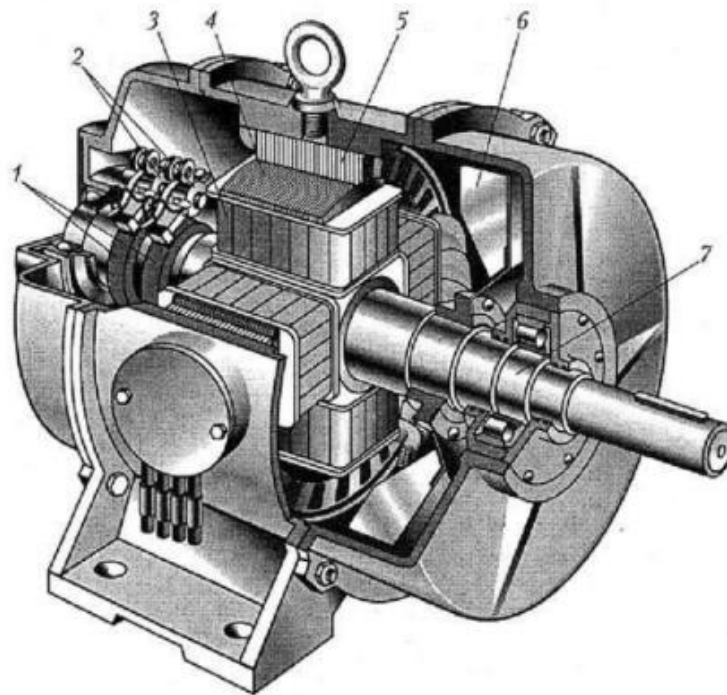
Рисунок 1.8 – Схема генератора постійного струму зі змішаним збудженням

Генератори змінного струму класифікуються за конструктивними особливостями обертових та нерухомих частин.

Генератори з нерухомими магнітними полюсами та обертовим якорем. У цій конфігурації статор (нерухома частина генератора) містить обмотку збудження, яка створює магнітне поле, тоді як ротор (рухома частина генератора) є якорем з обмоткою, де індукується струм.

Генератори з обертовими магнітними полюсами та нерухогим статором є більше поширеними, має обмотку збудження на роторі, що обертається, а статор містить обмотки, в яких індукується змінний струм.

Генератори змінного струму, своєю чергою, також класифікуються за типом збудження. Одним з найпоширеніших є синхронний генератор.



1 – контактні кільця, 2 – щетотримачі, 3 – полюсна котушка, 4 – полюсний наконечник, 5 – сердечник статора, 6 – вентилятор, 7 – вал

Рисунок 1.9 – Синхронний генератор

Для зручності виведення електричної енергії, у синхронних генераторах якір зазвичай розташований на статорі (нерухомих частині). Принцип їхньої роботи ґрунтується на явищі електромагнітної індукції: коли ротор (рухома

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

частина) обертається, магнітний потік, що створюється його обмоткою збудження, послідовно проходить через кожну фазу обмотки статора. Це призводить до індукції електрорушійної сили (ЕРС) у цих фазах.

У більшості випадків використовується трифазна розподілена обмотка якоря, де кожна фаза зміщена одна відносно одної на 120 градусів. Таке розташування забезпечує індукцію синусоїдальної ЕРС. Шляхом підключення цих фаз за стандартними схемами, такими як "трикутник" або "зірка", на виході генератора отримуємо трифазну напругу.

Принцип роботи короткозамкненого асинхронного двигуна базується на взаємодії магнітних полів. Коли трифазний змінний струм проходить через обмотки статора, він створює обертове магнітне поле.

Це обертове поле, своєю чергою, індукуює струми в стрижнях ротора, що й викликає його обертання. Важливо зазначити, що величина індукованих струмів у різних стрижнях ротора може відрізнятись. Це пояснюється тим, що кожен стрижень розташований під різним кутом відносно обертового магнітного поля, що призводить до неоднакової зміни магнітного потоку, який їх перетинає. Отже, величина струму в стрижнях ротора буде змінюватися в часі відповідно до їхнього положення в магнітному полі. (рисунок 1.10).

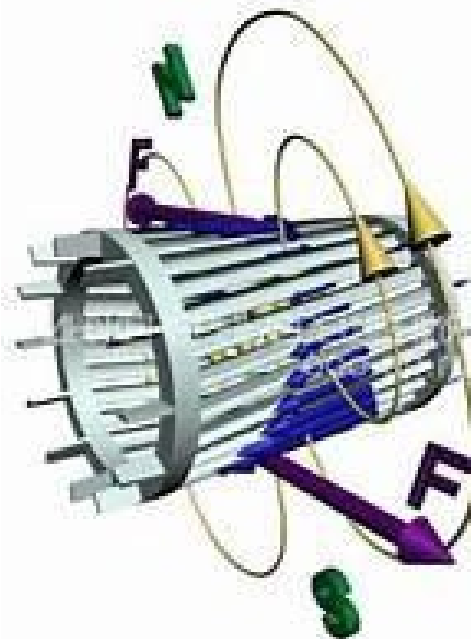


Рисунок 1.10 – Короткозамкнений ротор асинхронного двигуна

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

## 1.4 Генератор за схемою подвійного машинного живлення

Машина подвійного живлення (МДЖ) є конструктивно асинхронною машиною, оснащеною фазним ротором. Її ключова особливість полягає в роздільному живленні обмоток статора та ротора. При цьому сума або різниця частот струмів живлення кратна частоті обертання валу, що дозволяє гнучко керувати її режимами роботи.

Принцип дії МДЖ аналогічний синхронній машині. Це пояснюється тим, що струми в роторі індукуються не за рахунок ковзання ротора відносно поля статора, а шляхом подачі струму безпосередньо від зовнішнього джерела. Далі детальніше розглянемо генератор, що працює за схемою машини подвійного живлення.

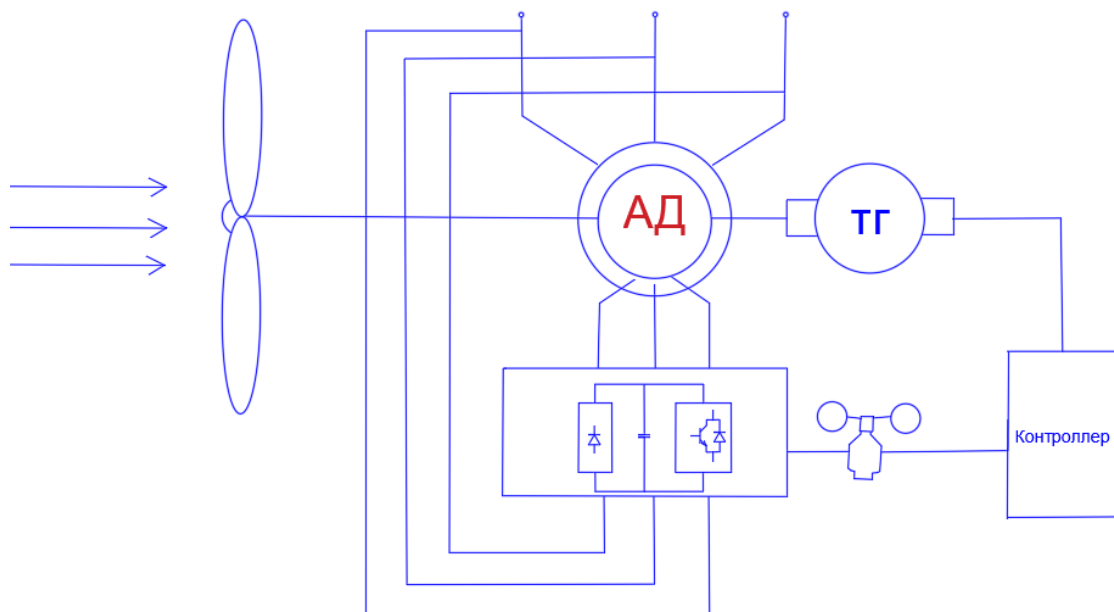


Рисунок 1.11 – Принципова схема машини подвійного живлення

Асинхронний двигун із фазним ротором є типом електричного двигуна, який дозволяє регулювати його характеристики шляхом додавання додаткових опорів у ланцюг ротора. Ця особливість робить його особливо придатним для застосування в умовах пуску з високим навантаженням на валу. Збільшення опору в роторному ланцюзі дає змогу збільшити пусковий момент двигуна, одночасно зменшуючи пускові струми, що є важливою перевагою для захисту мережі та

самого двигуна.

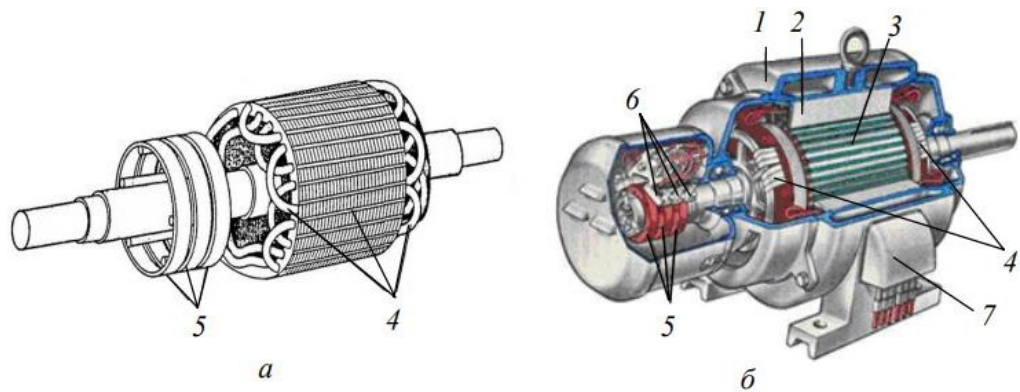


Рисунок 1.12 – Фазний ротора (а) та асинхронної машини з фазним ротором в розрізі (б): 1 – станина; 2 - сердечник статора, 3 - сердечник ротора; 4 - обмотка ротора; 5 - контактні кільця; 6 – щітки; 7 - клемна коробка

До основних технічних характеристик, що визначають параметри та ефективність ВЕУ, належать:

- номінальна потужність;
- номінальна швидкість вітру;
- мінімальна швидкість вітру;
- максимальна робоча швидкість вітру;
- Номінальна частота обертання вітроколеса.

Розглянемо ключові характеристики синхронного двигуна з фазним ротором. Однією з таких є напруга холостого ходу.

Напруга холостого ходу визначається як електрична напруга, що генерується машиною на її вихідних клеммах за умови відсутності будь-якого зовнішнього навантаження. Цей параметр є одним з фундаментальних номінальних значень, що характеризують роботу генератора.

Втрати холостого ходу — це сукупність втрат потужності, що виникають у генераторі під час його роботи без підключеного навантаження. До цих втрат належать втрати на вентиляцію, магнітні втрати (спричинені перемагнічуванням осердя) та інші внутрішні втрати, притаманні конструкції генератора.

В режимі холостого ходу ковзання  $s_0$  дорівнює нулю. Отже, характеристика

холостого ходу генератора при постійній частоті обертання ротора ідентична його характеристиці при постійній частоті струму.

$$U_1 = \varphi(I_0) \quad (1.3)$$

де  $\omega_r = \text{const}; f_1 = \text{const}; I = 0$ .

При аналізі функціонування генераторів особливу увагу приділяють їхнім навантажувальним характеристикам.

Однією з ключових є вольт-амперна характеристика (ВАХ). Вона являє собою графічну залежність вихідної напруги генератора від його вихідного струму за умови фіксованого механічного навантаження. Як правило, ВАХ відображається у вигляді кривої, яка ілюструє динаміку зміни вихідної напруги генератора зі зміною струму навантаження.

Потужна характеристика описує залежність між вихідною потужністю генератора та його струмом за певного механічного навантаження. Ця характеристика також представляється у вигляді кривої. Її аналіз є критично важливим для визначення робочої точки генератора, яка вказує на оптимальні умови його функціонування.

До регульовальних характеристик генератора відносять наступні важливі параметри.

Напруга регулювання – це міра зміни вихідної напруги генератора у відповідь на коливання механічного навантаження або інших операційних параметрів. Вона відображає здатність генератора підтримувати стабільну вихідну напругу навіть за мінливих умов експлуатації.

Швидкість регулювання – це час, який потрібен генератору, щоб скоригувати свою вихідну напругу після зміни навантаження. Висока швидкість регулювання свідчить про те, що генератор здатен оперативно відновлювати стабільну напругу в умовах зміни робочих параметрів.

Потік повітря володіє значним запасом кінетичної енергії. Ця енергія вітру може бути ефективно перетворена в механічну енергію за допомогою вітрового колеса або аналогічного робочого елемента вітрової установки. Надалі отримана механічна енергія, залежно від типу вітрової установки та її призначення, може

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути конвертована в інші корисні форми, такі як електрична енергія, теплова енергія або енергія стисненого газу.

Для перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну використовуються різні моделі вітрових двигунів. Залежно від співвідношення між потужністю вітрових установок та обсягом виробництва електроенергії, енергетичні системи, що їх інтегрують, поділяються на три основні класи.

Клас А включає вітрові установки, які функціонують автономно, тобто не інтегровані в єдину централізовану енергосистему. Ці ВЕУ, як правило, комплектуються невеликими акумуляторними батареями, ємність яких визначається специфікою їхнього застосування. Характерною особливістю таких систем є нестабілізована частота вихідної потужності. Переважно їх використовують для освітлення, живлення сигнальних пристроїв та обладнання зв'язку, де стабільність частоти не є критичною. Потужність вітрових установок класу А зазвичай не перевищує діапазон від 5 до 10 кВт.

Клас В охоплює вітроенергетичні установки, що інтегровані в локальні енергетичні системи. Ці системи, як правило, функціонують у регіонах, відокремлених від централізованих енергомереж природними або географічними бар'єрами. У таких конфігураціях комбіноване використання вітряних турбін та дизель-генераторних установок виявляється економічно вигіднішим. Вітряки в цьому випадку не лише виробляють електроенергію, а й функціонують як паливозберігаючі пристрої для дизельних станцій. Важливою особливістю систем класу В є стабільність вихідних параметрів електроенергії. Для подальшого підвищення ефективності та надійності в цих системах доцільно застосовувати великомасштабні системи накопичення енергії, такі як водневі батареї або малі гідроакумуляуючі електростанції.

До Класу С відносяться вітрові установки, що інтегровані у великі енергосистеми, де їхня встановлена потужність значно менша за загальну пропускну спроможність мережі. Ці ВЕУ є невід'ємною частиною вітроенергетичного комплексу і можуть суттєво впливати на енергетичний баланс як великого регіону, так і всієї держави.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Установки цього класу зазвичай мають потужність від 100 кВт до кількох мегават. Збільшення масштабу цих систем може призвести до інженерних викликів, пов'язаних з геометричними розмірами компонентів, а також до складнощів у функціонуванні механічних частин. Вітрогенератори можуть бути класифіковані за їхньою конструктивною схемою та призначенням на такі основні категорії (рисунок 1.13).

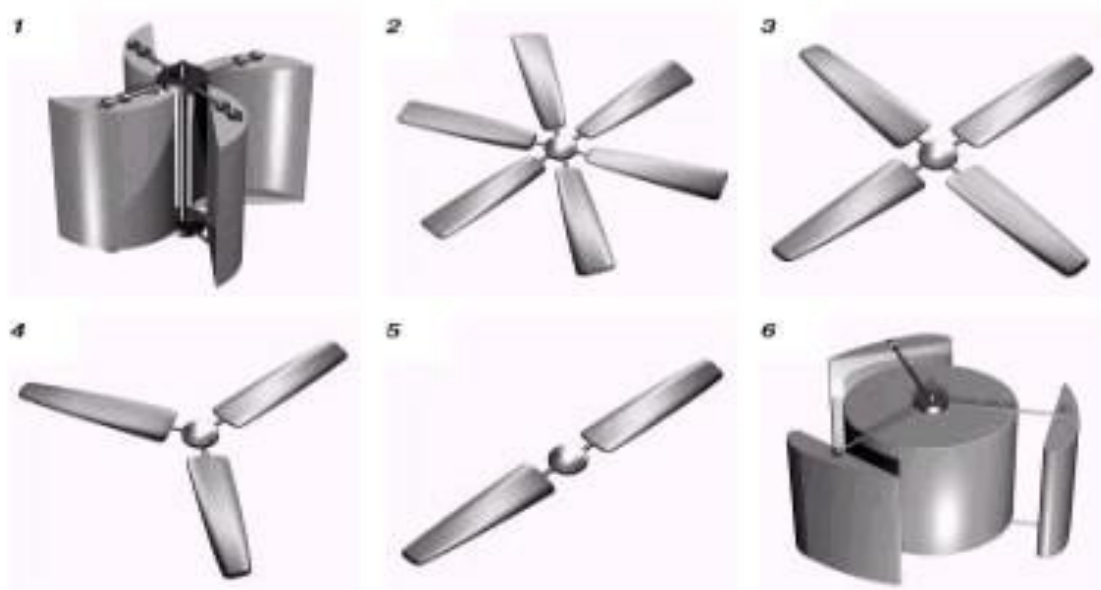


Рисунок 1.13 – Зразок вітряних турбін

Вітрові двигуни класифікуються за орієнтацією їхньої осі обертання.

З горизонтальною віссю (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines), часто оснащені лопатями в кількості від 2 до 5, є найбільш поширеними. Вони вимагають механізму орієнтації для максимального захоплення енергії вітру.

З вертикальною віссю (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines), такі різновиди, як ортогональні та лопатеві (Савоніуса) двигуни. Їхня перевага полягає у відсутності потреби в системі орієнтації за напрямком вітру, оскільки вони ефективні незалежно від нього.

Для оптимальної роботи крилових вітрових двигунів, які демонструють

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимальну ефективність при перпендикулярному впливі вітру на поверхню лопатей, необхідна автоматична система орієнтації лопатей (шпинделя). Цю функцію виконує стабілізатор крила.

Широка розповсюдженість крилових вітрових двигунів зумовлена їхньою високою швидкістю обертання. Це дозволяє їм ефективно взаємодіяти з електричними генераторами та мультиплікаторами (множниками швидкості). Швидкість обертання таких двигунів прямо пропорційна кількості лопатей, тому для досягнення високих обертів зазвичай використовують невелику кількість лопатей – до трьох. Завдяки поєднанню високої швидкості обертання та ефективності виробництва електроенергії, крилові вітрові двигуни набули значного поширення.

Вітрові агрегати з вертикальною віссю обертання (часто іменовані як "карусельні") мають певні аеродинамічні переваги порівняно з традиційними конструкціями. Зі зростанням швидкості вітру ці системи демонструють збільшення аеродинамічного опору, що сприяє стабілізації їхньої швидкості обертання.

Застосування вітрових двигунів з вертикальною віссю дає змогу використовувати асинхронні генератори з відносно простою електричною схемою. Це, своєю чергою, мінімізує ризик аварійних ситуацій під час періодів штилю або раптових змін вітрового потоку. Хоча теоретично можливе використання багатополюсних генераторів, що працюють на низьких обертах (без редуктора), такі рішення не набули широкого застосування. Це зумовлено їхньою низькою ефективністю при малих швидкостях вітру, а також неефективністю використання мультиплікаторів (множників швидкості) у цих випадках.

Однією з ключових переваг кругової конструкції є її омнідирекційність: вона здатна ефективно працювати незалежно від напрямку вітру, усуваючи потребу в складних системах орієнтації, що характерно для горизонтально-осьових турбін. Ця конструктивна особливість також спрощує реалізацію автоматичних регуляторів, які контролюють максимальну швидкість обертання під час роботи та оптимальний час підключення вітрового двигуна. Крім того, зі

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

збільшенням навантаження на такий двигун, його швидкість обертання знижується, водночас зростає крутний момент безпосередньо перед зупинкою.

За оцінками експертів, ортогональні вітрові установки є перспективними для генерації енергії. Однак, їхнє впровадження стикається зі значними труднощами, зокрема зі складністю інтеграції в енергосистему. Процес запуску таких установок вимагає поетапного підходу: спершу необхідно вивести їх на певну аеродинамічну конфігурацію та досягти необхідної потужності в режимі двигуна, і лише після цього перевести їх у режим генератора.

Накопичення енергії в ортогональних ВЕУ починається при швидкості вітру від 5 м/с, а номінальної потужності вони досягають при 14-16 м/с. За попередніми розрахунками, такі установки можуть працювати в діапазоні потужностей від 50 до 20 000 кВт. Прикладом є реальна установка потужністю 2000 кВт, де діаметр кільця, по якому рухаються лопаті, становить 80 метрів.

Варто зазначити, що високопотужні вітрові установки, як правило, мають значні габарити. Проте, існує альтернативний підхід, що передбачає збільшення кількості менших за розміром установок для досягнення сумарної необхідної потужності.

### **Висновки до розділу**

У цьому розділі проведено комплексний аналіз технологічного процесу отримання енергії за допомогою вітроенергетичних установок (ВЕУ) як об'єктів автоматичного керування та контролю. Зокрема, досліджено вітроенергетичний потенціал України, проаналізовано географічні особливості та перспективні регіони для розвитку вітроенергетики. Наведено оцінки технічного потенціалу та фактичних показників. Визначено ключові переваги та виклики розвитку галузі. Розглянуто технологічні аспекти ВЕУ. Детально описано конструкцію та принцип роботи вітроенергетичних установок. Проаналізовано основні компоненти системи. Наведено класифікацію ВЕУ за потужністю та способом інтеграції в енергосистему. Проведено аналіз генераторів для ВЕУ. Визначено ключові технічні характеристики ВЕУ.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ І ВИБІР МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПОСТАВЛЕНИХ ЗАДАЧ

### 2.1 Області застосування вітрових установок

Спектр застосування вітровенергетичних установок (ВЕУ) є надзвичайно широким, виходячи за межі традиційного використання кінетичної енергії повітряних мас. Хоча історично вітряки застосовувалися для механічних робіт, таких як помел зерна, сьогодні такі застосування є рідкісними. Наприклад, використання вітряних двигунів для підйому води може бути дуже ефективним: навіть невелика ВЕУ здатна підняти 30-50 літрів води з колодязя за годину при слабкому вітрі. Проте, найбільш ефективним залишається виробництво електроенергії за допомогою вітряних двигунів. Стаціонарні вітроелектростанції (ВЕС) здатні повністю забезпечити електроенергією невеликі виробничі об'єкти або житлові будинки. Для забезпечення безперебійного живлення в періоди відсутності вітру, ВЕУ можуть бути інтегровані з акумуляторними батареями, сонячними панелями та дизель-генераторами. Це не тільки гарантує автономність, але й дозволяє економити на споживанні електроенергії з централізованої мережі.

Крім стаціонарних систем, існують і мобільні вітряні електростанції. Вони застосовуються для заряджання автомобільних акумуляторів та живлення електроприладів під час подорожей. Такі портативні турбіни також незамінні для відновлення функціонування критично важливого обладнання на об'єктах, що постраждали від природних катастроф (землетруси) або військових дій.

Додатково, вітрові електростанції є оптимальним рішенням для гірських районів та інших важкодоступних локацій, де прокладання традиційних електромереж є економічно не вигідним або технічно складним.

Встановлення потужних стаціонарних вітрогенераторів вимагає проведення комплексних попередніх досліджень, будівельних та електромонтажних робіт. Загалом, усі вітрові електростанції поділяються на дві основні категорії: промислові та побутові. З огляду на вартість великих систем, серед приватних споживачів частіше використовуються невеликі вітроелектростанції потужністю

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

2–5 кВт. Такі міні-станції, за умови середньорічної швидкості вітру 3–4 м/с, цілком здатні забезпечити електроенергією замиські будинки середнього розміру, кафе або станції. Вітропарки, розраховані на тривалий термін експлуатації, виявляються економічнішими за дизельні та бензинові електростанції. Крім того, вітрогенератори є екологічно чистими, оскільки не виробляють шкідливих викидів. Вони також відзначаються автономністю, що робить їх ідеальними для використання на метеорологічних та геологічних станціях, фермах, у котеджах та котеджних селищах. Однак, до основних недоліків вітряних турбін належать потенційні перешкоди радіосигналам та нестабільність вироблення енергії, зумовлена коливаннями швидкості вітру [1].

## 2.2 Ефективність використання

Оскільки транспортування вітру не стоїть у порівнянні з традиційними джерелами рідкого або твердого палива, енергія, що виробляється вітровим двигуном, в усіх відношеннях економічна і навіть неоплачувана. Але це негаразд. Нам потрібно знати всі необхідні умови визначення того, де і як ефективно використовувати енергію вітру. Крім того, необхідно повністю охопити вимоги споживачів, знати специфіку вітру як джерела енергії, режим роботи вітроустановки та графік вироблення енергії. Отримати об'єктивний результат можна, повністю розглянувши всі фактори про технічні можливості та економічні умови використання вітроелектростанцій у певних умовах.

Ключовою передумовою для обґрунтованого застосування вітрових електростанцій (ВЕС) є забезпечення конкурентоспроможної вартості одиниці виробленої електроенергії порівняно з альтернативними джерелами. Однак, комплексна оцінка економічної ефективності вимагає всебічного аналізу, що включає: витрати на виробництво енергії (сюди входять капітальні та операційні витрати, пов'язані з будівництвом, експлуатацією та обслуговування ВЕС); ступінь економії палива (цей аспект є особливо актуальним при порівнянні ВЕС з традиційними електростанціями, що використовують викопне паливо); вартість частки у великих інвестиціях (оцінка рентабельності інвестицій у

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

вітроенергетичні проекти, враховуючи їхній довгостроковий характер та потенційний внесок у загальний енергетичний баланс).

Найбільш перспективними для розвитку вітроенергетики є південні області України - Одеська, Херсонська та Запорізька, де середня швидкість вітру досягає 7-9 м/с. Східні області, такі як Донецька та Дніпропетровська, з показниками 6-7 м/с, також придатні для розміщення вітрових електростанцій, хоча і менш ефективні. Західні регіони, зокрема Карпатський, мають обмежений потенціал через особливості рельєфу, що знижує середню швидкість вітру до 5-6,5 м/с.

Слід підкреслити, що використання вітрової енергії стає економічно доцільним за наявності двох ключових умов: середньорічної швидкості вітру не менше 5 м/с та відсутності доступу до централізованої мережевої потужності. При цьому, для об'єктивної оцінки ефективності вітроелектростанції, необхідно враховувати не лише її номінальну потужність, але й реальну швидкість генерації цієї потужності в існуючих вітрових умовах. Для повноцінного використання вітроенергетичного потенціалу необхідно вирішити низку технічних завдань. Перш за все, це оптимізація конструкції вітрових енергетичних установок, що включає вибір типу генератора, розрахунок оптимальної геометрії лопатей та визначення найефективнішої висоти щогли. Не менш важливим є розробка сучасних систем автоматизації, які повинні забезпечувати ефективне керування роботою установок, моніторинг їх стану та стабільність функціонування. Окремим викликом є інтеграція вітроенергетичних установок в загальну енергосистему, що вимагає вирішення проблеми нестабільності генерації.

### **2.3 Постановка завдання наукових досліджень**

Для вирішення цих завдань пропонується використовувати комплекс підходів. Оптимізація конструкції передбачає застосування комп'ютерного моделювання аеродинамічних характеристик, методів скінченних елементів для розрахунків міцності конструкцій, а також проведення експериментальних випробувань прототипів. У сфері автоматизації планується використовувати програмовані логічні контролери (ПЛК), SCADA-системи для моніторингу та

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

управління, а також розробляти спеціальні алгоритми адаптивного керування. Для ефективної інтеграції в енергосистему пропонується застосовувати гібридні рішення, сучасні акумуляторні системи накопичення енергії та інтелектуальні системи диспетчеризації.

Реалізація цих методів дозволить досягти значних результатів. Очікується підвищення коефіцієнта корисної дії вітроустановок на 15-20%, зниження собівартості виробництва електроенергії, забезпечення стабільності енергопостачання та скорочення термінів окупності інвестиційних проектів. Це відкриває нові перспективи для розвитку вітроенергетики в Україні.

Таким чином, для повноцінного використання вітроенергетичного потенціалу України необхідно реалізувати комплексний підхід, що включає оптимізацію конструкцій вітрових установок під місцеві умови, розробку ефективних систем автоматизації, забезпечення стабільної інтеграції в енергосистему та впровадження сучасних методів управління та моніторингу. Реалізація цих заходів дозволить нашій країні значно збільшити частку відновлюваної енергії в загальному балансі та забезпечити енергетичну безпеку на довгострокову перспективу.

### **Висновки до розділу**

У розділі розглянуто ключові аспекти застосування та ефективності вітроенергетичних установок (ВЕУ) в сучасних умовах. Детально досліджено технічні особливості ефективної експлуатації вітрових установок, зокрема необхідність використання автоматизованих систем керування для компенсації нестабільності вітрового потоку. Визначено, що оптимальним рішенням для підвищення ефективності ВЕУ є їх інтеграція в гібридні системи з акумуляторними батареями та іншими джерелами енергії. Результати проведеного аналізу демонструють, що реалізація запропонованих заходів дозволить підвищити ККД вітроустановок на 15-20%, знизити собівартість виробництва електроенергії та забезпечити стабільність енергопостачання.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

## 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 3.1 Математичний опис роботи системи

Розглянемо роботу системи автоматичного регулювання вітрової енергетичної установки у режимі без застосування спеціальних регулюючих пристроїв. У такій конфігурації система працює за принципом відкритого контуру, де всі параметри роботи визначаються виключно фізичними характеристиками обладнання та зовнішніми умовами.

Основна схема роботи такої системи включає кілька ключових компонентів. Вітрове колесо, яке перетворює кінетичну енергію повітряних потоків на механічне обертання. Потім через трансмісійну систему це обертання передається на електричний генератор, який здійснює перетворення механічної енергії в електричну. На завершальному етапі отримана електроенергія надходить до споживачів.

Головною особливістю даної схеми є відсутність будь-яких регулюючих механізмів. Це означає, що всі вихідні параметри - напруга, частота, потужність - повністю залежать від змінних умов зовнішнього середовища, зокрема від швидкості вітру, а також від характеристик самого обладнання і характеру навантаження.

Математичний опис роботи такої системи базується на двох основних групах рівнянь. Для механічної частини використовується рівняння динаміки обертального руху, яке враховує момент інерції, крутний момент від вітру, навантаження від генератора та різні види втрат. Електрична частина, у разі використання асинхронного генератора, описується співвідношенням між напругою на виході, електрорушійною силою та кутовою швидкістю обертання.

Основним недоліком такої системи є її нестабільність. При зміні швидкості вітру відбуваються значні коливання вихідних параметрів. Наприклад, при різкому пориві вітру система не має механізмів обмеження обертів, що може призвести до перевантаження генератора або надмірного зростання напруги. З

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

іншого боку, при ослабленні вітру спостерігається різке падіння потужності, що робить систему ненадійною для забезпечення стабільного електропостачання.

Проте, така схема має і певні переваги. Вона відзначається простотою конструкції, відсутністю складних і дорогих керуючих пристроїв, що робить її дешевою у виробництві та експлуатації. Це дозволяє використовувати подібні системи в простих автономних установках, де не потрібна висока стабільність параметрів, наприклад, для опалення або освітлення.

Таким чином, хоча система без регулювання має обмежену сферу застосування, вона слугує важливою основою для розуміння принципів роботи вітроенергетичних установок і є відправною точкою для розробки більш складних і ефективних систем з автоматичним регулюванням робочих параметрів.

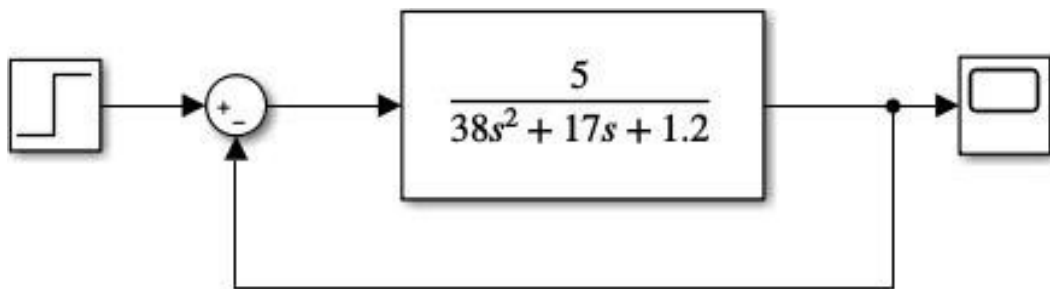


Рисунок 3.1 – Модель схеми САР без регулювання

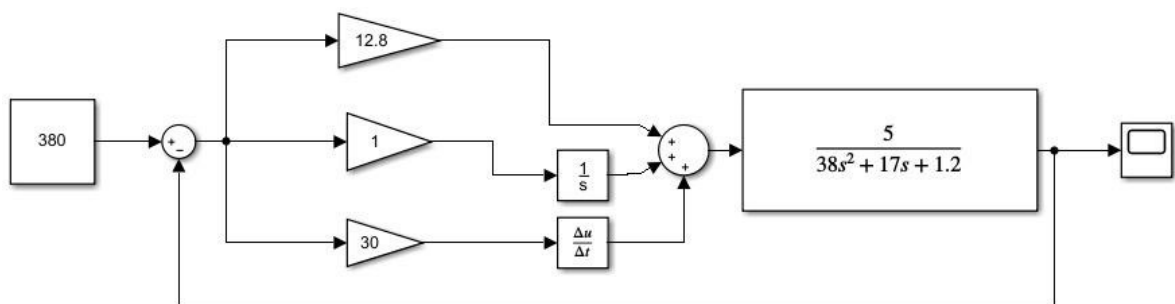


Рисунок 3.2 – Моделювання схеми ПІД регулюванням

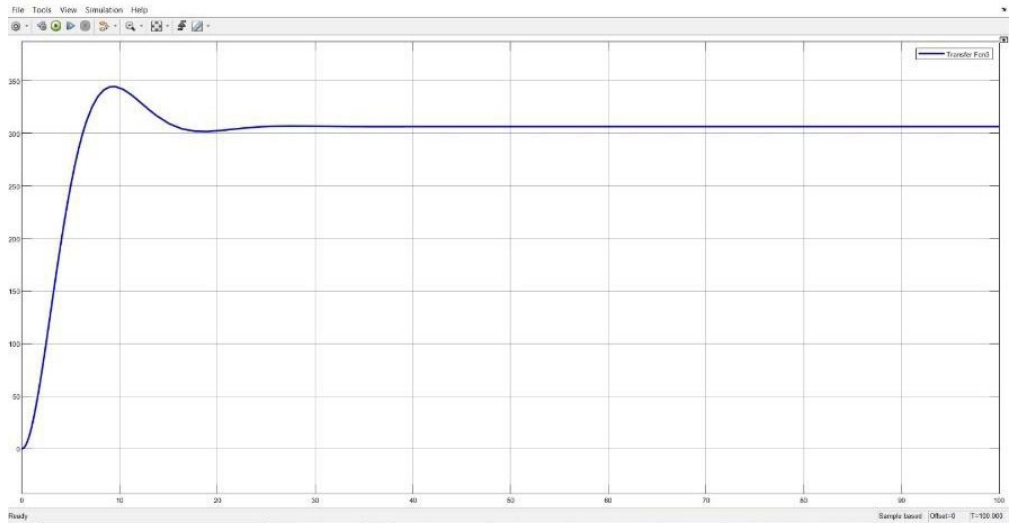


Рисунок 3.3 – Результати моделювання без регулятора

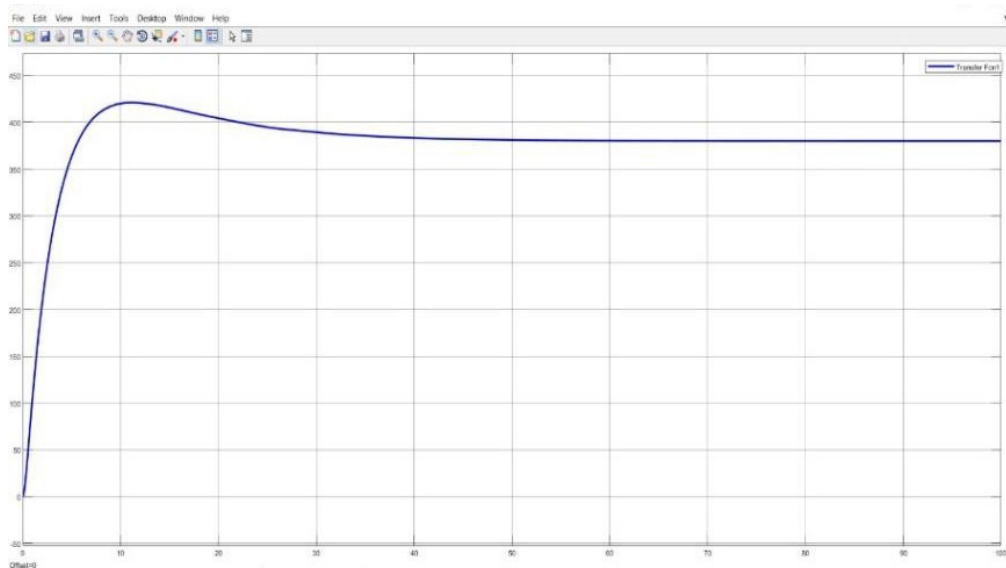


Рисунок 3.4 – Результати моделювання з регулятором

Передана функція генератора

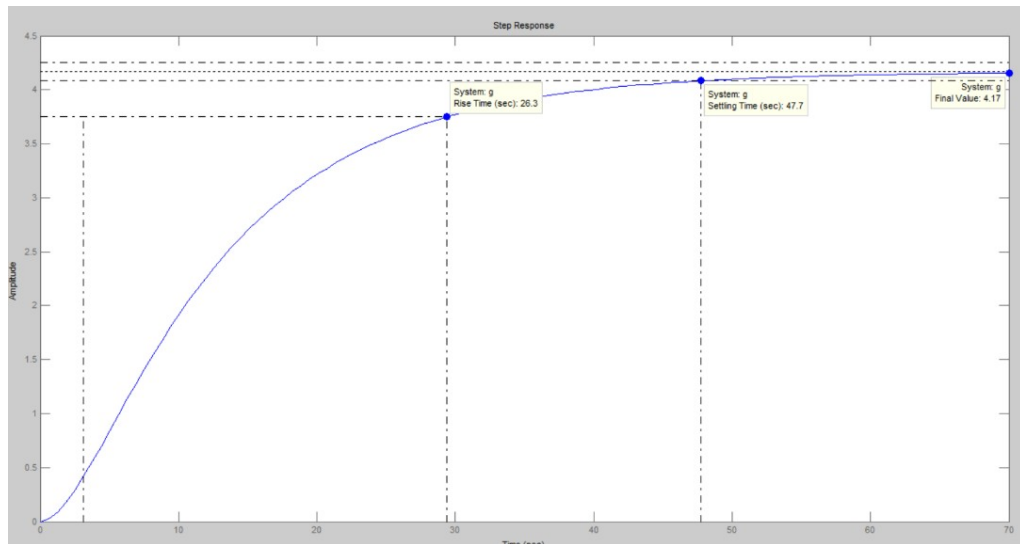
```
>> g=tf([5],[38 17 1.2])
```

```
Transfer function:
```

```
5
```

```
-----  
38 s^2 + 17 s + 1.2
```

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



показники якості перехідних процесів

### 3.2 Дослідження на стійкість

Перший метод стійкості Ляпунова — це метод дослідження стійкості нелінійних систем шляхом їх лінеаризації навколо точки рівноваги. Він дозволяє зробити висновки про стійкість вихідної нелінійної системи на основі аналізу її лінеаризованої моделі.

Алгоритм застосування:

Крок 1. Знаходження точок рівноваги. Розв'язати рівняння  $f(x)=0$ , де  $f(x)$  — права частина системи  $x'=f(x)$ .

Крок 2. Лінеаризація. Обчислити матрицю Якобі  $A$  системи в точці рівноваги  $x^*$ :  $A=\partial x/\partial f x=x^*$

Крок 3. Аналіз власних значень. Визначити стійкість на основі власних значень  $\lambda_i$  матриці  $A$ :

- Якщо  $\text{Re}(\lambda_i) < 0$  для всіх  $\lambda_i \rightarrow$  асимптотична стійкість.
- Якщо  $\text{Re}(\lambda_i) > 0$  хоча б для одного  $\lambda_i \rightarrow$  нестійкість.
- Якщо  $\text{Re}(\lambda_i) = 0$  (уявні корені)  $\rightarrow$  потрібен другий метод Ляпунова.

Полюси замкнутої системи

```
>> pole(g)
```

```
ans =
```

```
-0.3595
```

```
-0.0878
```

									Арк.
									40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Отже маємо асимптотичну стійкість за першим методом Ляпунова.

Дослідимо систему на стійкість за критерієм Найквіста. Критерій стійкості Найквіста є одним з найважливіших інструментів у теорії автоматичного керування, який дозволяє оцінити стійкість замкнутої системи на основі аналізу розімкнутої.

Його особливість полягає в тому, що він дає змогу зробити висновки про поведінку системи без необхідності безпосереднього знаходження полюсів замкнутого контуру, що значно спрощує аналіз складних систем.

Сутність критерію полягає в наступному. Розглядається передавальна функція розімкнутої системи  $W(s)$ , яка описує динаміку системи до замикання зворотного зв'язку. Для аналізу будується амплітудно-фазова характеристика (АФХ) цієї системи - графік, який показує, як змінюється комплексний коефіцієнт передачі при зміні частоти від нуля до нескінченності.

Ключовим моментом у критерії Найквіста є поняття "обходу" критичної точки  $(-1, j0)$  на комплексній площині. Якщо розімкнута система стійка (тобто всі її полюси знаходяться в лівій півплощині), то для стійкості замкнутої системи достатньо, щоб АФХ не охоплювала цю критичну точку.

У випадку, коли розімкнута система містить нестійкі полюси, критерій ускладнюється - кількість обходів критичної точки має відповідати половині кількості нестійких полюсів.

На практиці аналіз за Найквістом виконується наступним чином. Спочатку будується амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи. Потім підраховується кількість обходів критичної точки  $(-1, j0)$ . Якщо система стійка в розімкнутому стані, то відсутність обходів гарантує стійкість замкнутого контуру. Для нестійких розімкнутих систем необхідно, щоб кількість обходів у протилежному напрямку до годинникової стрілки дорівнювала половині кількості нестійких полюсів.

Особливу увагу варто приділити системам з астатизмом, які мають полюси на уявній осі (наприклад, у початку координат). У таких випадках АФХ доповнюється умовними дугами нескінченно великого радіусу, що дозволяє

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коректно застосувати критерій.

Важливою перевагою критерію Найквіста є його застосовність до систем із запізненням, а також до випадків, коли передавальна функція містить трансцендентні члени.

Крім того, він дозволяє не тільки оцінити факт стійкості, але й визначити запаси стійкості за амплітудою та фазою, що особливо важливо при проектуванні систем регулювання.

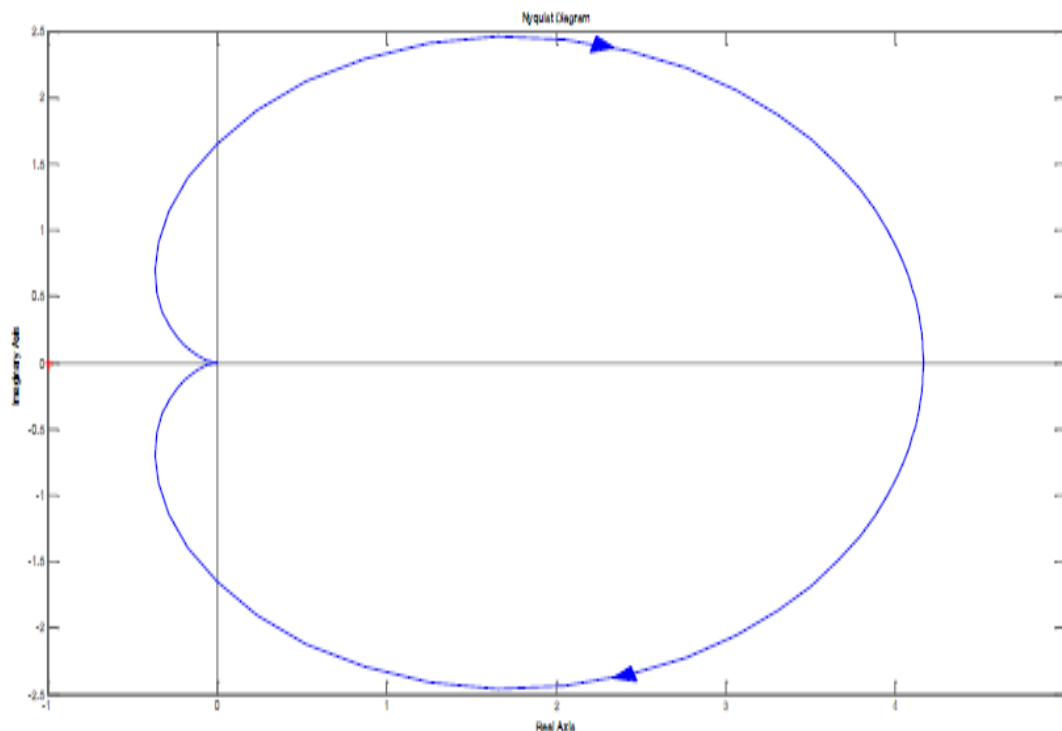


Рисунок 3.6 – АФХ розімкнутої системи

Побудувавши АФХ розімкнутої системи, проаналізувавши її за критерієм стійкості Найквіста, можна зробити висновок, що замкнута система буде стійка.

### **Висновки до розділу**

У даному розділі проведено комплексний аналіз математичного опису роботи вітроенергетичної установки без застосування регулюючих пристроїв. Дослідження показало, що у відкритій системі вихідні параметри - напруга, частота та потужність - повністю залежать від зовнішніх факторів, зокрема

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

швидкості вітру, що призводить до суттєвих коливань у роботі системи. Було розглянуто основні компоненти системи: вітрове колесо, яке перетворює кінетичну енергію вітру на механічне обертання, трансмісійну систему та електричний генератор, що перетворює механічну енергію в електричну.

Математичний опис системи включав два основних аспекти: механічну частину, яка описується рівнянням динаміки обертального руху, та електричну частину, що базується на співвідношеннях між напругою, електрорушійною силою та кутовою швидкістю обертання для асинхронного генератора.

Проведене моделювання двох варіантів системи - без регулятора та з ПД-регулятором - наочно продемонструвало, що впровадження регулюючого пристрою суттєво підвищує стабільність роботи установки.

Для оцінки стійкості системи було застосовано два методи: перший метод Ляпунова, який підтвердив асимптотичну стійкість системи через аналіз лінеаризованої моделі, та критерій Найквіста, що дозволив оцінити стійкість замкнутої системи на основі аналізу амплітудно-фазової характеристики розімкнутої системи. Обидва методи підтвердили можливість створення стійкої системи автоматичного керування.

Результати дослідження свідчать, що хоча система без регулювання відзначається простотою конструкції та низькою вартістю, її практичне застосування обмежене через нестабільність роботи.

Впровадження ПД-регулятора дозволяє ефективно усунути ці недоліки, забезпечуючи стабільність основних параметрів роботи.

Отримані результати створюють міцну теоретичну основу для подальшого проектування та вдосконалення систем автоматичного керування вітроенергетичними установками, що є важливим кроком у розвитку відновлюваної енергетики.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

## 4 ПОБУДОВА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ВЕУ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 4.1 Побудова структурної схеми системи управління ВЕУ

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) вітроенергетичної установки (ВЕУ) — це комплекс апаратно-програмних засобів, призначений для моніторингу та контролю процесу перетворення кінетичної енергії вітру в електричну.

Ця система забезпечує зворотний зв'язок, активно впливаючи на хід процесу при виявленні відхилень від встановлених параметрів. Її ключовими функціями є регулювання та оптимізація керованого процесу, що сприяє ефективній та стабільній роботі ВЕУ.

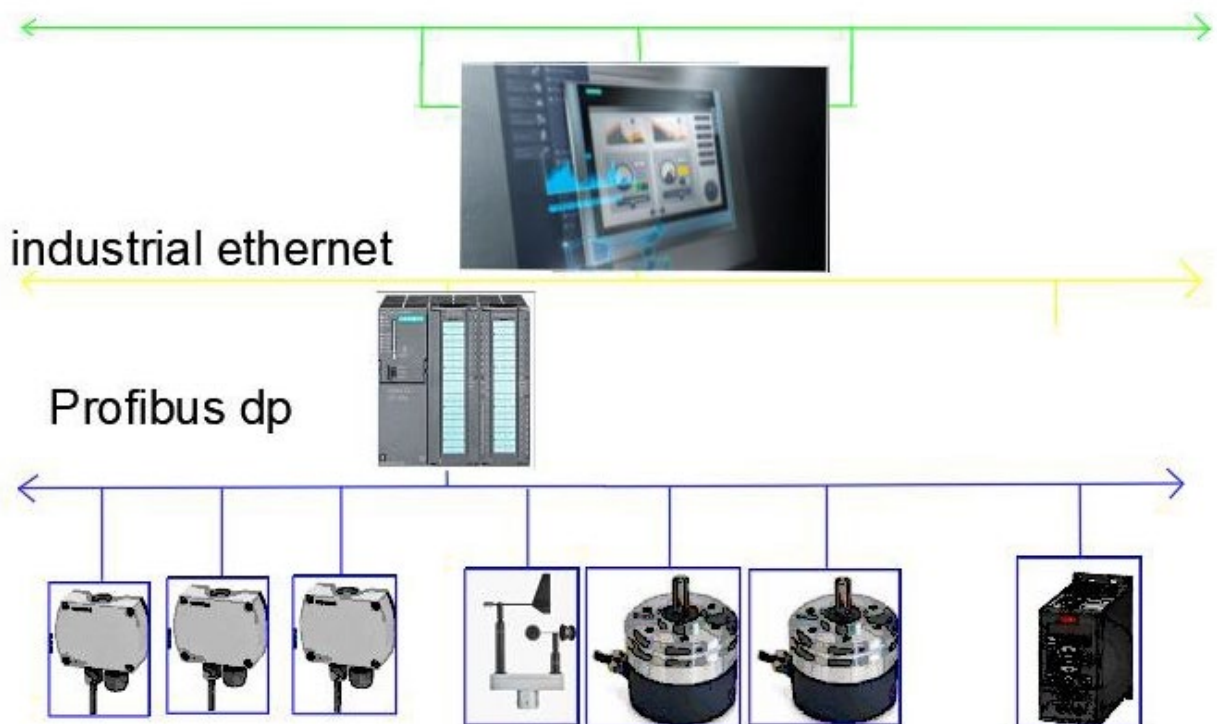


Рисунок 4.1 – Структурна схема АСУТП ВЕУ

Класична автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) вітроенергетичної установки (ВЕУ) має трирівневу архітектуру.

Нижній рівень складається з контрольно-вимірювальних приладів (КВП) та

виконавчих механізмів, що забезпечують збір первинних даних і безпосередній вплив на об'єкт управління.

Середній рівень представлений програмованими логічними контролерами (ПЛК), які виконують функції збору та обробки даних з нижнього рівня, а також реалізують алгоритми управління та регулювання.

Верхній рівень відповідає за візуалізацію даних та їх довгострокове зберігання. Цей рівень часто реалізується за допомогою SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition), що надають операторам повний контроль та моніторинг над усією системою ВЕУ.

#### **4.2 Функціональна схема автоматизації вітрогенераторної установки**

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є ключовим документом, що деталізує функціональну структуру та обсяг автоматизації для технологічних установок і окремих агрегатів у складі вітроенергетичних установок (ВЕУ). Вона визначає логіку взаємодії компонентів системи та їхнє призначення для забезпечення ефективного управління процесом.

Функціональна схема автоматизації (ФСА) — це креслення, що схематично, за допомогою умовних позначень, відображає:

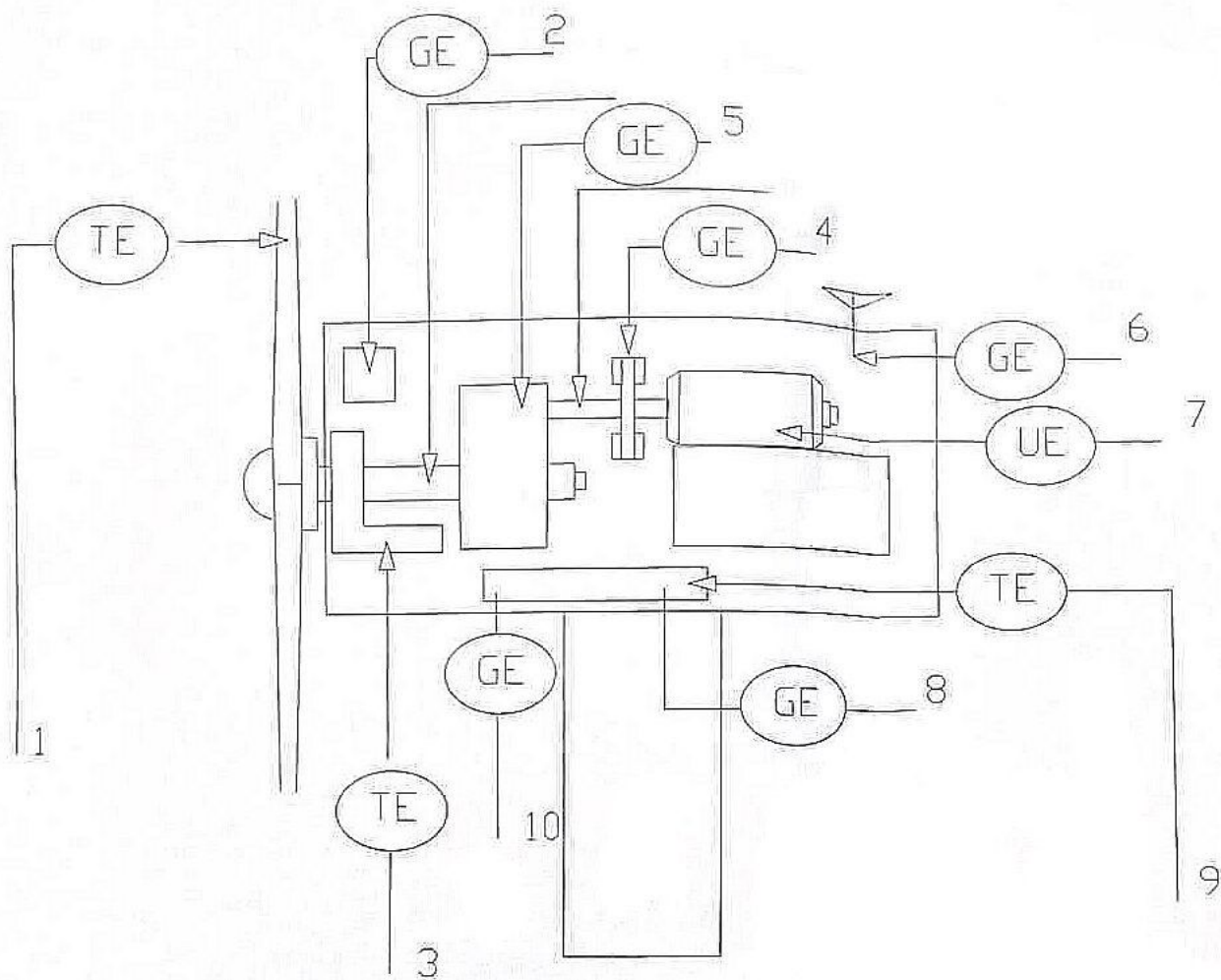
- 1) Технологічне обладнання - всі компоненти виробничого процесу.
- 2) Комунікації - зв'язки між різними частинами системи.
- 3) Органи управління та засоби автоматизації - прилади, регулятори, обчислювальні пристрої, що контролюють процес.

На ФСА також показано зв'язки між технологічним обладнанням та елементами автоматики, а також взаємозв'язки між окремими елементами автоматики.

Функції контролю та управління відображаються згідно зі стандартами ГОСТ 21.404–85 та відповідними галузевими нормативними документами.

Ця схема детально представляє всі прилади контрольно-вимірювальні та обладнання автоматизації, що використовуються в системі.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Прилади по місцях		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Символ ST-300	Прилади на щиті управління										
	AI	•	•	•			•	•	•	•	•
	AO		•					•			•
	DI			•	•						
	DO										
	SCADA	CCIB	ELIB	ITIM	ELIB	SEPM	SEEA	SELIC	MSIC	LEIB	MSIB

Рисунок 4.2 – Функціональна схема ВЕУ

Таблиця 4.1 – Контрольно-вимірвальні прилади (КВП) та обладнання автоматизації

№	Найменування вимірюваного параметра	Позначення на схемі	Примітка
1	Температура підшипників лопаті	TEIR	<p>Основне позначення вимірюваної величини:</p> <p>Т – температура</p> <p>G – розмір, положення, переміщення</p> <p>U – кілька різнорідних величин</p> <p>Додаткове позначення:</p> <p>Е – первинні перетворювачі (термопара, терморезистор)</p> <p>Функціональний признак приладу:</p> <p>І – індикація</p> <p>R – реєстрація</p> <p>С – автоматичне регулювання</p>
2	Температура підшипників головного вала	TEIR	
	Температура підшипників приводу	TEIR	

№	Найменування вимірюваного параметра	Позначення на схемі	Примітка
3	Поворот гондоли	—	
4	Датчик кута повороту лопаті (положення)	GIRC	
5	Датчик кута повороту приводу гондоли	GIRC	
6	Датчик положення дискового гальма	GIRC	
7	Датчик стану редуктора	GIRC	
8	Датчик напрямку вітру (анемометр)	GIRC	
9	Датчик положення гальма гондоли	GIRC	
10	Перетворювач частоти (вимірювання струму, напруги тощо в генераторі)	UIRC	

#### 4.3 Вибір технічних засобів автоматизації

Контрольно-вимірювальні прилади та автоматика (КВП та А) — це загальна назва для всього обладнання, що використовується для вимірювання фізичних величин, контролю та автоматизації виробничих процесів.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

До КВП та А відносяться не лише промислові пристрої, а й такі повсякденні засоби, як лічильники електроенергії та води, регулятори тиску, а також автоматичні перетворювачі частоти та подібне обладнання.

Таблиця 4.2 – Контрольно-вимірювальні прилади

№	Найменування вимірюваного параметра	Тип та марка	Кількість
1	Температура підшипників лопаті	EM3/E	1
2	Температура підшипників головного вала	EM3/E	1
3	Температура підшипників приводу повороту гондоли	EM3/E	1
4	Датчик кута повороту лопатей (положення лопаті)	Opkon ERC10 BISS-SSI	1
5	Датчик кута повороту приводу гондоли (положення гондоли)	Opkon ERC10 BISS-SSI	1
6	Датчик положення дискового гальма	IME12- 04BNSZC0K	1
7	Датчик положення стану редуктора	IME12- 04BNSZC0K	1
8	Датчик напрямку вітру (анемометр)	WRG/O	1
9	Датчик положення гальма гондоли	IME12- 04BNSZC0K	1
10	Перетворювач частоти (вимірювання різнорідних величин у генераторі: струм, напруга тощо)	ACS150-01E- 04A7-2	1

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Перетворювач температури — це спеціалізований датчик, що конвертує вимірне значення температури в сигнал постійного струму або напруги. Це обладнання вирішує низку важливих завдань і є невід'ємною частиною багатьох автоматизованих ліній та систем.

Зовнішній вигляд перетворювача представлено на рисунку 4.3, а його ключові характеристики — у таблиці 4.2.



Рисунок 4.3 – Перетворювач температури, що закручується модель EM3/E

Таблиця 4.3 – Характеристики перетворювач температури – модель EM3/E

Параметр	Значення/Характеристика	Примітки
Тип датчика	Термоперетворювач з термопарою або термоопором	Залежить від модифікації
Діапазон вимірювань	-50°C до +300°C	Робочий діапазон
Вихідний сигнал	4...20 мА / 0...10 В	Аналоговий, стандартний
Точність	±0.5% від діапазону	При 25°C
Час реакції	< 2 сек	Для 90% зміни температури
Захист від навколишнього	IP65	Пило- та вологостійкий

Параметр	Значення/Характеристика	Примітки
середовища		
Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь AISI 304	Корозійостійкий
Приєднання	Різьбове з'єднання G½"	Стандартне
Живлення	24 В DC (±10%)	

Енкодер для вітроустановки — це пристрій, що вимірює кутове положення або обертання ключових компонентів, таких як ротор, головка, що обертається, або інші рухомі частини. Він надає дані про положення, швидкість та напрямок обертання.

Енкодери встановлюються в різних місцях вітроустановки, залежно від конкретних завдань вимірювання. У нашому випадку енкодер виконує роль датчика положення лопатей та датчика положення гондоли.

Компанія BEI Sensors (Maxon Motor Group) пропонує широкий вибір енкодерів для вітроустановок, які вирізняються високою точністю, надійністю та здатністю працювати в екстремальних умовах.



Рисунок 4.4 – Енкодер Orkon ERC10 BISS-SSI

Датчик горизонтального напрямку вітру WRG/O вимірює горизонтальний напрямок вітру. Прилад для вимірювання напрямку вітру може бути обладнаний двома основними типами сенсорів: безконтактною оптично-електронною

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

розгорткою або потенціометром з контактним кільцем.

Вихідний сигнал, що відображає напрямок вітру, може мати три різні формати, залежно від конкретної моделі пристрою: це може бути струмовий вихід, вихід напруги або вихід опору.



Рисунок 4.5 – Датчик горизонтального напрямку вітру WRG/O

Таблиця 4.4 - Технічні характеристики датчика напрямку вітру WRG/O

Характеристика	Значення	Одиниця виміру
Принцип вимірювання	Оптико-електронний або потенціометр з контактним кільцем	—
Діапазон вимірювань	0°–360°	градуси
Точність	±3°–±5° (залежить від моделі)	градуси
Вихідний сигнал	Аналоговий (4–20 мА, 0–10 В) або цифровий (RS485, Modbus)	—
Роздільна здатність	1°	градуси

Характеристика	Значення	Одиниця виміру
Швидкість відгуку	< 0.5 с	секунди
Робоча температура	-40°C до +70°C	°C
Захист від вологи та пилу	IP66 / IP67	—
Матеріал корпусу	Анодований алюміній, покритий лаком	—
Діаметр монтажного отвору	25–50 мм (залежить від кріплення)	мм
Живлення	12–24 V DC ( $\pm 10\%$ )	Вольт
Споживана потужність	< 2 Вт	Ватт



Рисунок 4.6 – Частотний перетворювач

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Таблиця 4.5 – Технічні характеристики частотного перетворювача ACS150-01E-04A7-2

Характеристика	Значення
Виробник	ABB
Серія	ACS150
Номінальна потужність	0.75 кВт (1 к.с.)
Номінальний струм	2.1 А
Діапазон напруги живлення	200-240 В $\pm$ 10%, 1 фаза, 50/60 Гц
Вихідна частота	0.1-500 Гц
ККД	>97%
Спосіб керування	Скалярне (U/f), векторне



Рисунок 4.7 – Генератор Exmark 750 Вт

Таблиця 4.6 – Генератор Exmark 750 Вт

Параметр	Значення
Номінальна потужність	750 Вт
Максимальна потужність	800 Вт
Напруга	12/24/48 В DC (залежно від моделі)

Параметр	Значення
Тип генератора	3-фазний синхронний з постійними магнітами
Стартова швидкість вітру	2.5–3 м/с
Номінальна швидкість вітру	10–12 м/с
Діаметр ротора	2.2–2.5 м
Кількість лопатей	3 (нержавіюча сталь або композит)
Захист від перевантаження	Автоматичне гальмування при сильному вітрі (>25 м/с)
Робоча температура	-40°C до +60°C
Ступінь захисту (IP)	IP54 (пило- та вологостійкий)
Вага	15–20 кг (залежно від комплектації)

Перетворювачі частоти — це спеціалізоване обладнання, призначене для керування двигунами змінного струму. Ці пристрої дозволяють точно змінювати крутний момент на валу та швидкість обертання двигуна.

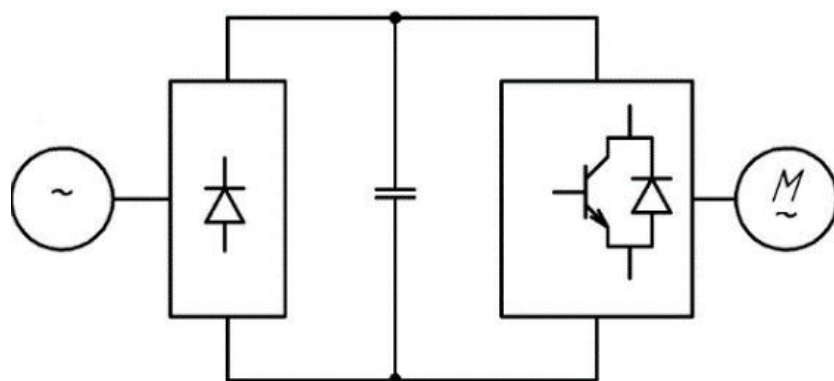


Рисунок 4.8 – Частотний перетворювач

Сучасні перетворювачі частоти (ПЧ) є багатофункціональними пристроями, що поєднують у собі можливості декількох систем.

Функції контролера дозволяють впроваджувати складні алгоритми автоматичного керування, забезпечуючи точне та гнучке управління процесами.

Захисні функції діють як захисні апарати, автоматично відключаючи електричний двигун у разі виникнення аварійних або ненормальних режимів роботи, що запобігає пошкодженням.

Обмежувачі пускових струмів значно знижують кидки струму (в 2-3 рази) під час запуску двигуна, що зменшує навантаження на електромережу та збільшує термін служби обладнання.

Перетворювачі частоти застосовують у схемах управління всіх типів двигунів змінного струму: асинхронних з короткозамкненим або фазним ротором, синхронних з роторними обмотками та на постійних магнітах.

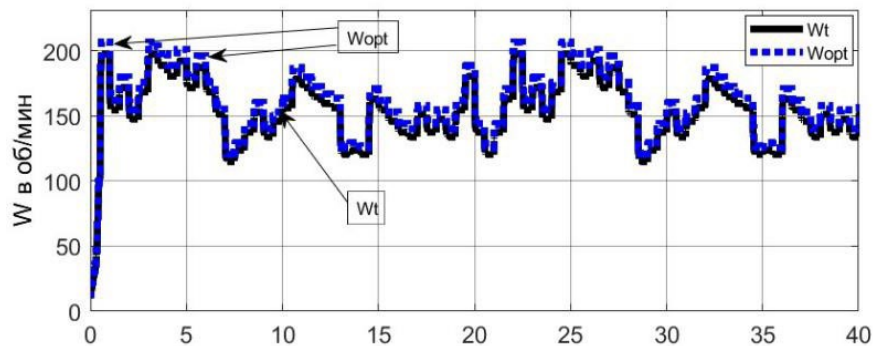


Рисунок 4.9 – Залежність зміни швидкості вітру від випадкових значень

Оптимальні значення за наслідками прикладу:

$$\lambda_{opt}=8.1 \quad C_t=0.065$$

$$C_{p-opt} = 0.48$$

при куті атаки лопатей  $\beta=0$ .

Результати моделювання вітротурбіни. Моделювання вітротурбіни часто дає змогу визначити такі ключові параметри: частоту обертання турбіни, її оптимальне значення частоти обертання, а також крутний момент вітротурбіни.

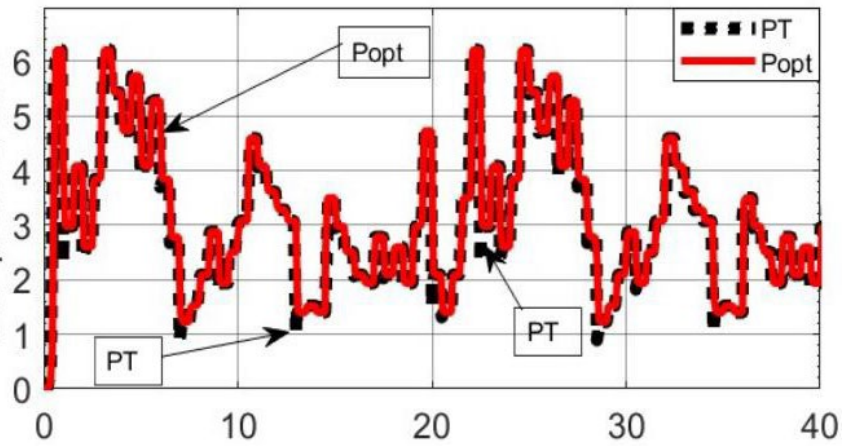


Рисунок 4.10 – Графік зміни частоти обертання вітротурбіни в часі

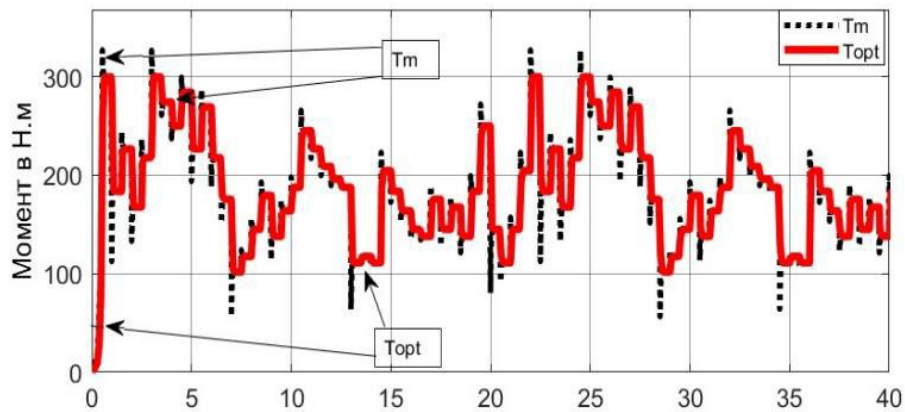


Рисунок 4.11 – Графік залежності зміни моменту вітротурбіни від часу

#### 4.4 Розрахунок потужності генератора

Для визначення обсягу спожитої електроенергії використовується наступна формула:

$$S = P \cdot t_0 \quad (4.1)$$

де  $S$  – використана електроенергія, вимірюється у ват-годинах (Вт·год),  $P$  – номінальна потужність електроприладу, у ватах (Вт),  $t_0$  – час безвідмовної роботи електроприладу, у годинах (год). Наприклад, якщо електроприлад потужністю 450 Вт працює протягом 12 годин на добу, то добове споживання електроенергії розраховується так:

$$S=450 \cdot 12=5400 \text{ Вт}\cdot\text{год}$$

Це значення показує, скільки електроенергії було використано за один день.

За аналогічним принципом можна розрахувати споживання електроенергії для інших електроприладів.

Вироблення електроенергії можна розрахувати так:

$$P_{\text{В}} = P \cdot t_{\text{р}} \quad (4.2)$$

де  $P_{\text{max}}$  – потужність виробництва електроенергії, Вт;  $P$  – номінальна потужність генератора, Вт.

Можливо розрахувати номінальну потужність генератора, якщо відома робоча потужність електроприймача.

$$P = \frac{6720}{24} = 2,8, \text{ кВт.}$$

Через нестабільність вітру та можливі перебої в електропостачанні, що виникають через недостатню потужність вітрогенератора, для забезпечення безперебійної роботи електроприладів необхідно враховувати додаткові 4 кВт електроенергії. Цей обсяг становить 30% від загального енергоспоживання.

Таким чином, номінальна потужність генератора дорівнює:

$$P = \frac{8250}{24} = 3,4, \text{ кВт.}$$

Для аналізу режиму холостого ходу генератора, ми будемо використовувати значення номінальної потужності та номінальної напруги, отримані з попередніх розрахунків (4.3), де  $U_{\text{H}} = 480 \text{ В}$ ,  $P_{\text{H}} = 3.4 \text{ кВт}$ .

Тоді виберемо  $f_{\text{H}}$  і кількість пар полюсів ( $p$ ), де  $f_{\text{H}} = 50 \text{ Гц}$ ,  $p = 3$ .

Звідси потрібно порахувати номінальну швидкість обертання:

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

$$N_n = \frac{120 \cdot 50}{3} = 2000, \text{ об/хв.}$$

Можна визначити синхронний момент  $T_s$ :

$$T_s = \frac{3,4 \cdot 1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 2000} = 270, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Розраховуємо теоретичне значення холостого ходу  $U_0$ :

$$U_0 = \frac{480 \cdot 0,3}{3,4 \cdot 1000} = 0,04, \text{ В.}$$

#### 4.5 Розрахунок потужності акумулятора

Акумулятор ємністю 2250 Вт·год забезпечує 12 годин роботи від резервного джерела живлення, при цьому ефективність інвертора становить 80%.

$$I_{\text{зам акумулятор}} = W/U/\eta = A \quad (4.8)$$

де  $I_{\text{зам акумулятор}}$  – струм уповільнення акумулятора, А;  $W$  - Потужність, Вт;  $U$  – напруга акумулятора, В;  $\eta$  – допустимий інтервал зміни коефіцієнта потужності навантаження інвертора, %.

$$I = 2250/18/0,8 = 156.3 \text{ А} \quad (4.9)$$

Ми розрахуємо ємність батареї, використовуючи наявні дані, і обчислимо струм розряду акумулятора.

$$E = I \cdot H \quad (4.10)$$

де  $E$  - ємність акумулятора, А години;  $H$  – від резервного електропостачання час роботи замовника, h

$$E = 156,3 \cdot 12 = 1875 \text{ А}\cdot\text{год} \quad (4.11)$$

Оскільки вимагається 12 годин автономної роботи, розрахункову потужність потрібно збільшити на 20%.

Виходячи з наявних даних, ми оберемо акумуляторну батарею, яка забезпечить 1380 А·год. Наприклад, можна використати 12 акумуляторів НР 100 А·год.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4.6 Розрахунок інвертора

Інверторні станції зазвичай вибирають із розрахунку на вихідну напругу 220 В, частоту 50 Гц та максимальну потужність, що відповідає споживанню електроенергії. Інвертор функціонує у двох основних режимах. Тривалий режим роботи відповідає номінальній потужності інвертора, за якої він може працювати безперервно протягом тривалого часу. У режимі перевантаження (піковий режим) більшість інверторів здатні видавати потужність, що в 1,5 рази перевищує номінальну. Цей режим розрахований на короткочасні навантаження, тривалістю до 30 хвилин, наприклад, при запуску холодильника або іншого обладнання з високим пусковим струмом.

Для ефективної та стабільної роботи системи потужність інвертора має відповідати розрахунковій потужності вітроелектростанції. Щоб забезпечити максимальне використання 250 Вт електроенергії, можна встановити інвертори з потужністю 300 ВА. Цей пристрій призначений для візуального відображення даних з обладнання. Він розрахований на змінну напругу 220 В, частоту 50 Гц та працює від акумулятора з напругою 18 В.

Основні технічні характеристики інвертора:

- вхідна напруга: 10...15 В.
- вихідна напруга: 215...230 В (зберігається в цьому діапазоні при змінах вхідної напруги та потужності навантаження).
- максимальна вихідна потужність: 350 Вт.

Реле захисту від струму є спеціалізованим компонентом. Його котушка складається з 1-2 витків дроту, розрахованих на проходження струму 20-30 А. Цей дріт КЕМ-2 розміщений навколо геркона або іншого корпусу з нормально розімкнутим контактом. Крім того, пристрій включає вузол захисту по струму, зібраний на реле К1. Для такого захисту використовується спеціальне реле на базі геркона КЕМ-2. Детальні технічні характеристики геркона КЕМ-2 наведені в таблиці 4.8.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Таблиця 4.7 - Технічні характеристики геркона КЕМ-2

Параметр	Значення / Характеристика
Тип контакту	Нормально розімкнуті (NO)
Герметична колба	Скляна, заповнена інертним газом
Максимальна комутаційна напруга	180 В
Максимальний комутаційний струм	0,25 А
Максимальна потужність комутації	9 Вт
Опір контактів у замкнутому стані	$\leq 0,1$ Ом
Опір ізоляції у розімкнутому стані	$\geq 100$ МОм
Час спрацьовування	$\leq 1,0$ мс
Час розмикання	$\leq 0,3$ мс
Максимальна магнітна рушійна сила (МДС)	65 А·виток
Мінімальна чутливість (МДС)	10 А·виток
Механічний ресурс	1 000 000 циклів
Робоча температура	-60°C до +120°C
Ступінь захисту (IP)	IP40 (базовий)
Габарити	Діаметр 3 мм, довжина 41 мм

Для успішного запуску, потрібен магніторушійна сила (МРС)  $F = 65$  А. Знаючи середній струм ( $I_{cp}=30$ А), ми можемо обчислити пусковий струм і визначити кількість циклів.

$$W = F/I_{cp} \quad (4.12)$$

де  $W$  - кількість оборотів, об;  $F$  - Максимальний запуск МДС, А;  $I_{п}$  - пусковий струм, А.

Якщо  $I_{п} = 30 \dots 45$ А, тоді

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

$$W = \frac{247,5}{30 \dots 45} \approx 8,25 \dots 5,5 \text{ об.}$$

Відповідь:  $W=8$

$$\phi HdL = F \quad (4.13)$$

де  $H$  – вектор магнітного поля, Тл · А;  $d$  – Довжина інтегрального рядка.

Враховуючи, що котушка згортається у футляр,  $L$  — це довжина циліндра. Це дозволяє розмістити контакти всередині котушки вздовж її осі.

$$\phi HdL = H * L \quad (4.14)$$

Якщо котушка розташована на краю автоматизованої зарядної станції (АЗС), напруженість  $H$  зменшиться вдвічі. Це дозволяє розміщувати упаковку навколо зарядної станції та регулювати чутливість реле в певних межах.

У разі зниження вихідної змінної напруги з будь-яких причин припиняється підсвічування оптрона фотодіодом. Це призводить до перемикання мікросхеми DA1 на активний струм, який проходить через реле і перевищує задане значення. У результаті контакти геркона К 1.1 блокуються. На вході FC (рішення 1) мікросхеми DA1 з'являється високий рівень, і вихід мікросхеми переходить у стан низького рівня. Транзистори VT5 і VT6 швидко закриваються, що призводить до негайного зниження струму. Після цього мікросхема DA1 залишається заблокованою (низький рівень на виході), попри розмикання контактів геркона К 1.1.

Для повторного увімкнення перетворювача необхідна наявність високої напруги на вході DA1 (розчин 3) IN. Це може бути викликано короткочасними перебоями в подачі електроенергії або короткочасним розрядженням конденсатора С1. Для цього можна встановити кнопку без фіксації, контакт якої підключається паралельно конденсатору С1.

Оскільки вихідна напруга має імпульсний характер, був встановлений конденсатор С8 для її згладжування та наближення до синусоїдальної форми. Світлодіод HL1 виконує функцію індикатора наявності вихідної напруги перетворювача.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Трансформатор Т1 виготовлено на базі джерела живлення для телевізійної лампи ТС-180. З нього видалено всі вторинні обмотки, залишаючи лише мережеву обмотку на 220 В. Цей трансформатор виконує функцію вихідної котушки конвертера. Напівсекції 1.1 та 1.2 намотані дротом ПЕВ-2 діаметром 1.8 мм і містять по 35 витків кожна. Початок однієї секції з'єднується з кінцем другої, утворюючи середню точку першої обмотки.

Елементи VD4 (світлодіодний міст) та конденсатор С8, а також трансформатор Т1, монтуються на односторонній вертикальній платі з фольгованого склотекстоліту товщиною 1.5–2 мм, як це показано на кресленні. Транзистори VT5 і VT6 приклеюються до плати та кріпляться до металевих радіаторів розміром 40x30 мм через ізолюючі прокладки. Гвинти, що фіксують транзистори, оснащені фторопластовими втулками та склопластиковими шайбами для ізоляції.

Для електричного зарядного пристрою потужністю 2.73 кВт та акумулятора ємністю 1200 А·год підходить інвертор Map Sin Pro 12 3000.

#### 4.7 Розрахунок безпечного автоматичного керування

Безпечне автоматичне відключення визначається як повне відключення всіх фаз у місці аварії з напругою до 1000 В протягом не більше 0.2 секунд при однофазних замиканнях або при спрацьовуванні захисної системи, що забезпечує автоматичне роз'єднання полюсів.

Експериментальний стенд розміщений в кінці лінії 380/220 В, функціонує як споживач нульової енергії і живиться від мережі 220 В. Можливі ситуації, коли відбувається відмова заземлення на значній відстані від трансформатора, що впливає на потенціал корпусу. За таких умов, початкова напруга становить  $U_{поч}=30$  В (значення вольтажного реле), активний опір  $R_p=400$  Ом, а індуктивний опір  $X=200$  Ом.

У випадку зіткнення з корпусом, якщо людина ізольована від ділянки проходження струму через заземлення у вологому середовищі, приймається, що коефіцієнти  $\sigma_1=\sigma_2=1$ .

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умова захисту дорівнює:

$$U_{\text{зах. сторона}} = U_{\text{дод. напр}} \quad (4.15)$$

В інших ситуаціях

$$U_{cp} = U \cdot \left| \frac{z_p}{z_p + R_g} \right| \quad (4.16)$$

У цьому випадку, ми встановили, що бар'єр для надкористування ( $R_g$ ) становить 470 Ом. Якщо напруга контакту досягає 60 В, це вважається безпечним рівнем.

Отже, якщо напруга перевищує допустиме значення при контакті людини з корпусом приладу або фазою електричної мережі, існує ризик ураження електричним струмом. У такій ситуації захисним заходом є негайне усунення людини з небезпечної зони.

#### 4.8 Вибір автоматичного резерву

Автоматичне введення резерву (ABP) дозволяє системі автоматично перемикає живлення об'єкта з акумуляторної батареї (АКБ) на резервне джерело у випадку зникнення централізованого електропостачання.

Крім того, спеціальне реле забезпечує захист електричних пристроїв від пошкоджень, спричинених критично високою або низькою напругою, що виникають внаслідок збоїв у мережі. Важливо, що джерело живлення для цього реле надходить безпосередньо від контрольованої напруги, усуваючи потребу в окремому додатковому джерелі живлення.

Таблиця 4.8 - Рекомендовані параметри реле для ВЕУ

Характеристика	Значення
Робоча напруга	100–500 В АС/DC (або 24/48 В DC для керування через контролер)
Діапазон захисту	- Низька напруга: <170 В (~АС) / <20 В (=DC)
	- Висока напруга: >250 В (~АС) / >60 В (=DC)

Характеристика	Значення
Час затримки	0,1–10 сек (регульований, щоб уникнути помилкових спрацьовувань)
Живлення реле	Від мережі або окремого джерела (12/24 В DC)
Контакти	1–2 перемикаючих (NO/NC) на 5–10 А
Робоча температура	-25°C до +60°C
Стандарти	IEC 60255, EN 60947 (для промислових умов)

Вибір пристроїв та кабелів здійснюється відповідно до споживання енергії. Тому, виходячи з попередньо розрахованого споживання, ми підбираємо кабель, враховуючи відстань від вітрогенератора до споживача. Далі розраховуємо його вартість та необхідну потужність генератора.

Розрахунок кабелю базується на його усереднених характеристиках, які можуть відрізнятися в різних специфікаціях. Наприклад, опір мідних жил може змінюватися залежно від виробника або типу кабелю. Також, допустимий струм на квадратний міліметр поперечного перерізу кабелю може варіюватися залежно від його конструкції та умов прокладання.

Всі розрахунки ґрунтуються на заздалегідь визначеній потужності споживачів енергії.

Розраховуємо струму споживача за наступною формулою:

$$I = \frac{A}{U} \quad (4.18)$$

де  $I$  – сила струму, А;  $P$  – потужність приймача, Вт;  $U$  – вихідне значення на інвертор, В.

$$I = \frac{5140}{220} = 23,4, \text{ А}, \quad (4.19)$$

А опір споживачів – за такою формулою

$$R = \frac{U}{I}, \text{ Ом.} \quad (4.20)$$

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

де  $R$  – споживчий опір, Ом.

$$R = \frac{220}{23,4} = 9,4$$

Відповідно до отриманих розрахунків, для відкритого способу прокладання кабелю необхідно обрати кабель певного перетину.

#### 4.9 Вибір ПЛК

Програмовані логічні контролери (ПЛК) є сучасною та ефективною заміною традиційним релейно-контактним схемам управління. Це електронні пристрої, здатні виконувати широкий спектр функцій автоматизації та управління в промислових системах, значно спрощуючи та підвищуючи їх ефективність. Використання ПЛК має низку переваг перед релейною автоматикою:

На відміну від релейних схем, де логіка визначається фізичними з'єднаннями між компонентами, ПЛК дозволяють реалізувати логіку управління програмним шляхом. Це надає значну гнучкість та зручність при розробці та внесенні змін до алгоритмів управління. ПЛК об'єднують у собі безліч функцій, для яких раніше були потрібні окремі реле, таймери та інші компоненти. Така інтеграція дозволяє скоротити кількість компонентів у системі, зменшити ймовірність помилок та підвищити загальну надійність роботи. Програмовані логічні контролери (ПЛК) здатні обробляти як дискретні (он/офф), так і аналогові сигнали (наприклад, показники температури чи тиску). Ця універсальність дозволяє реалізовувати складні алгоритми управління та контролю. ПЛК забезпечують єдиний стандартизований підхід до програмування та налаштування, що значно спрощує тиражування систем та їхнє обслуговування на різних промислових об'єктах. Крім того, вони підтримують віддалений моніторинг та діагностику, що полегшує технічне обслуговування та налагодження. ПЛК можуть взаємодіяти з іншими пристроями в системі автоматизації, такими як приводи, перетворювачі частоти, сенсори тощо. Це дозволяє реалізувати комплексне управління та координацію всіх компонентів.

Усі використані контрольно-вимірювальні прилади та автоматика (КВП та

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

А) у вітроустановці на середньому рівні детально описані в таблиці 4.6.

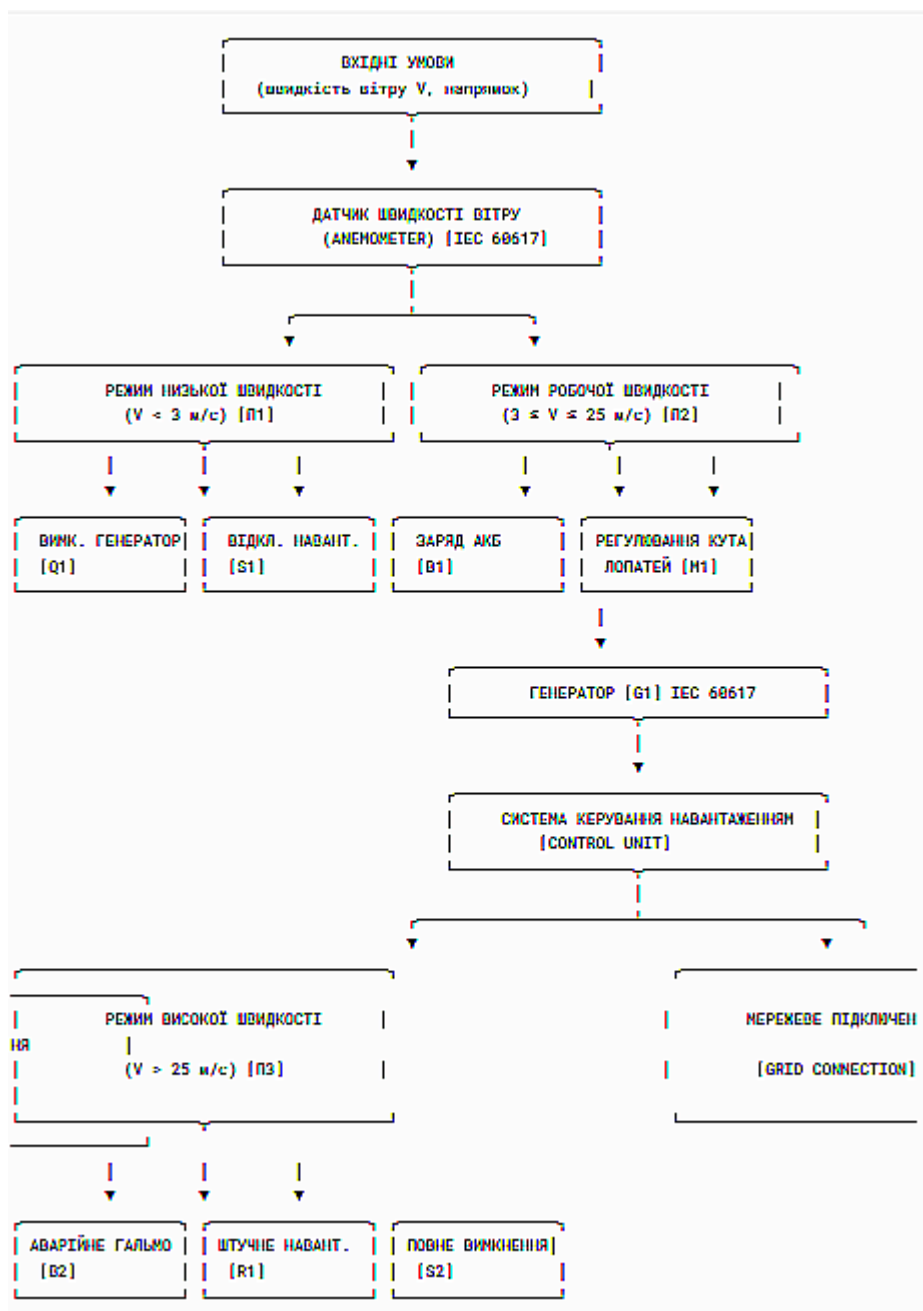


Рисунок 4.12– Блок схема вітроустановки при різних значеннях швидкості вітру

Тут прийняті такі стандартних позначень та символи:

- [Q1] – вимикач;
- [S1], [S2] - комутаційні апарати;
- [B1], [B2] - акумуляторні системи;
- [M1] - приводний механізм;

- [G1] – генератор;
- [R1] - резистивне навантаження.

Таблиця 4.9 – Характеристики контролера 6AG1 317-2EK13-2AB0

Категорія	Параметр	Значення/Характеристика	
Основні параметри	Виробник	Siemens	
	Серія	SIMATIC S7-300	
	Тип процесора	32-бітний RISC	
	Тактова частота	48 МГц	
	Оперативна пам'ять (код)	1 МБ	
	Робоча пам'ять (дані)	512 КБ	
	Функціональні можливості	Вбудовані інтерфейси	1×PROFIBUS DP (12 Мбіт/с), 1×MPI
Підтримувані протоколи		PROFIBUS DP V0/V1, MPI	
Макс. кількість модулів		32	
Продуктивність		Час виконання бінарної операції	0.05 мкс
		Обробка 1000 біт	0.1 мс
	Обробка 1000 дійсних чисел	0.6 мс	
Пам'ять	Вбудована пам'ять	4 МБ (програма+дані)	
	Підтримка MMC-карт	до 8 МБ	
	Тривалість збереження даних	до 10 років (при 25°C)	
Комунікації	Макс. підключень	16 (MPI+PROFIBUS)	
	Підтримка OPC Server	через SIMATIC NET	

## Продовження таблиці 4.9

Категорія	Параметр	Значення/Характеристика
Фізичні параметри	Робоча температура	0...+60°C
	Ступінь захисту	IP20
	Вага	0.53 кг
	Габарити (Ш×В×Г)	40×125×117 мм
Захисні функції	Захист від	перегріву, КЗ, перевантаження
	Діагностика	LED-індикація, моніторинг
Програмне забезпечення	Підтримувані ПЗ	STEP 7 (TIA Portal/Classic)
	Мови програмування	LAD, FBD, SCL, STL
Додаткові функції	Реальний годинник	з корекцією
	Лічильники/таймери	256/256
	Макс. блоків даних	2048
Застосування	Основні сфери	промислова автоматизація, ТПА
Комплектація	Базовий комплект	контролер, документація
	Опційне оснащення	MMC-карта, комунікаційні кабелі

Модуль 6AG1 153-1AA03-2XB0 є компонентом системи автоматизації SIMATIC ET 200SP від Siemens. Це пристрій розподіленого введення-виведення, призначений для підключення віддалених датчиків та виконавчих пристроїв у системах автоматизації. Модуль підтримує протокол PROFINET IO, що забезпечує високошвидкісну передачу даних між ним і центральним контролером. Він оснащений певною кількістю цифрових входів і виходів, які дозволяють підключати дискретні пристрої, такі як датчики, кнопки, реле тощо. Модуль може живитися як від змінного (AC), так і від постійного (DC) струму, залежно від

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

конфігурації вашої системи. Для налаштування та програмування модуля використовується програмне забезпечення Siemens, зокрема Step 7 або TIA Portal. Модуль легко встановлюється на шину, яка забезпечує спільне живлення та зв'язок з іншими модулями системи ET 200SP.



Рисунок 4.13 – Модуль розподіленого введення-виведення 6AG1 153-1AA03-2XB0

Таблиця 4.10 – Технічні характеристик модуля розподіленого введення-виведення 6AG1 153-1AA03-2XB0

Категорія	Параметр	Значення/Характеристика
Основні параметри	Виробник	Siemens
	Серія	SIMATIC ET 200S
	Тип модуля	Інтерфейсний модуль (ІМ)
	Артикульний номер	6AG1 153-1AA03-2XB0
	Підтримувані модулі	До 63 модулів введення-виведення
Функціональні можливості	Максимальна кількість каналів	256 байт (вхід) + 256 байт (вихід)
	Підтримка гарячої заміни	Так
	Інтерфейс	PROFIBUS DP
Комунікаційні		

Категорія	Параметр	Значення/Характеристика	
параметри	Швидкість передачі даних	До 12 Мбіт/с	
	Адресний простір	До 244 байт (вхід/вихід)	
	Електричні параметри	Напруга живлення	24 В DC (20.4 - 28.8 В)
Електричні параметри	Споживана потужність	1.5 Вт	
	Струм споживання	70 мА (типовий)	
	Механічні параметри	Ступінь захисту	IP20
Механічні параметри	Вага	0.15 кг	
	Габарити (Ш × В × Г)	40 × 126 × 117 мм	
	Робочі умови	Робоча температура	0°C до +60°C
Робочі умови	Температура зберігання	-40°C до +70°C	
	Відносна вологість	5% - 95% (без конденсату)	
	Підключення	Тип клеми	Винтові клеми
Підключення	Кількість підключень	1 PROFIBUS DP	
	Діагностика	Індикація стану	LED (RUN, BF, SF)
	Сумісність	Підтримувані процесори	S7-300, S7-400, S7-1200, S7-1500
Підтримка в ПЗ		STEP 7 (TIA Portal, Classic)	
Додаткові функції		Підтримка DPV1	Так
Додаткові функції	Автоматичне оновлення даних	Так	
	Комплектація	Стандартне оснащення	Модуль, документація

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71



Рисунок 4.14 – Аналоговий модуль вводу 6AG1 331-7NF00-2AB0

Таблиця 4.11 – Технічні характеристики аналогового модуля введення SM 331 (6AG1 331-7NF00-2AB0)

Категорія	Параметр	Значення
Основні параметри	Виробник	Siemens
	Серія	SIMATIC S7-300
	Тип модуля	Аналоговий модуль введення (AI)
	Артикульний номер	6AG1 331-7NF00-2AB0
Функціональні можливості	Кількість каналів	8
	Роздільна здатність	16 біт (включаючи знак)
	Діапазон вимірювання	$\pm 10$ В, $\pm 5$ В, $\pm 2.5$ В, 0–20 мА, 4–20 мА
	Точність	$\pm 0.3\%$ (для напруги), $\pm 0.5\%$ (для струму)
	Частота дискретизації	50 мс (на канал)
Підключення	Тип підключення	Гальванічно розв'язані входи
	Клеми	Винтові клеми (20-контактний

Категорія	Параметр	Значення
		роз'єм)
Електричні параметри	Напруга живлення	24 В DC (20.4–28.8 В)
	Споживана потужність	1.5 Вт
	Максимальний вхідний струм	25 мА (на канал)
Робочі умови	Робоча температура	0°C до +60°C
	Температура зберігання	-40°C до +70°C
	Ступінь захисту	IP20
Діагностика	Індикація стану	LED (SF, RUN)
	Діагностика помилок	Обрив ланцюга, перевантаження
Сумісність	Підтримувані процесори	S7-300, S7-400 (через PROFIBUS)
	Підтримка в ПЗ	STEP 7 (TIA Portal, Classic)
Додаткові функції	Фільтрація сигналу	Програмована (50/60 Гц)
	Калібрування	Програмне (через STEP 7)
Комплектація	Стандартне оснащення	Модуль, документація



Рисунок 4.15 – Модуль введення дискретних сигналів 6ES7321-1BL00-0AA0

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Таблиця 4.12 – Технічні характеристики модуля введення дискретних сигналів SM 321 (6ES7 321-1BL00-0AA0)

Категорія	Параметр	Значення
Основні параметри	Виробник	Siemens
	Серія	SIMATIC S7-300
	Тип модуля	Цифровий вхід (DI)
	Артикульний номер	6ES7 321-1BL00-0AA0
	Функціональні можливості	Кількість каналів
Функціональні можливості	Тип сигналу	24V DC (стандартний PNP/NPN)
	Рівень напруги введення	15-30V DC (номінал 24V)
	Струм введення	7mA (типовий)
	Час реакції	1.2-4.8 мс (залежить від фільтра)
	Підключення	Тип підключення
Електричні параметри	Клеми	Винтові клеми (40-контактний роз'єм)
	Напруга живлення	24V DC (20.4-28.8V)
	Споживана	2.5W

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ

Арк.

74

## Продовження таблиці 4.12

Категорія	Параметр	Значення
	потужність	
	Розсіювана потужність	3.5W
Робочі умови	Робоча температура	0°C до +60°C
	Температура зберігання	-40°C до +70°C
	Ступінь захисту	IP20
Діагностика	Індикація стану	LED (на кожен канал)
	Діагностика помилок	Немає
Сумісність	Підтримувані процесори	S7-300, S7-400
	Підтримка в ПЗ	STEP 7 (TIA Portal, Classic)
Додаткові функції	Фільтрація сигналу	Програмована (0.1/0.5/3/15 мс)
	Захист від переполюсовки	Так
Механічні параметри	Вага	0.35 кг
	Габарити (Ш × В × Г)	40 × 125 × 117 мм
Комплектація	Стандартне оснащення	Модуль, документація

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75



Рисунок 4.16 – Профільна шина 6ES7390-1AE80-0AA0



Рисунок 4.17 – Шинний з'єднувач для підключення до мереж PROFIBUS 6ES7972-0BA52-0XA0

Таблиця 4.13 - Технічні характеристики шинного з'єднувача PROFIBUS (6ES7 972-0BA52-0XA0)

Категорія	Параметр	Значення
Основні параметри	Виробник	Siemens
	Тип з'єднувача	Шинний з'єднувач (Bus Connector)
	Артикульний номер	6ES7 972-0BA52-0XA0
Функціональні можливості	Призначення	Підключення до PROFIBUS DP
	Максимальна швидкість передачі	12 Мбіт/с

Категорія	Параметр	Значення
	Кількість підключень	1 вхід, 1 вихід (Т-розгалуження)
Конструктивні особливості	Тип відведення кабелю	Під кутом 90°
	Роз'єми	9-контактні D-Sub (чоловічий/жіночий)
	Кріплення	Без роз'єма підключення (Fast Connect)
	Електричні параметри	Номінальна напруга
	Максимальний струм	2A
Механічні параметри	Габарити (Ш × В × Г)	15.8 × 59 × 35.6 мм
	Вага	0.05 кг
	Матеріал корпусу	Пластик (технологія IPCD)
Ступінь захисту	IP-клас	IP20
Робочі умови	Робоча температура	0°C до +60°C
	Температура зберігання	-40°C до +70°C
	Відносна вологість	5% - 95% (без конденсату)
Сумісність	Підтримувані кабелі	PROFIBUS FC (Fast Connect)
	Підтримувані мережі	PROFIBUS DP
Монтаж	Спосіб встановлення	На DIN-рейку або прямий монтаж
Комплектація	Стандартне оснащення	З'єднувач, документація

## Висновки до розділу

У даному розділі було насамперед, розроблено та представлено структурну схему автоматизованої системи управління технологічним процесом ВЕУ, яка складається з трьох рівнів.

Була представлена функціональна схема автоматизації ВЕУ, що схематично відображає технологічне обладнання, комунікації, органи управління та засоби автоматизації, а також зв'язки між ними. Були детально описані та обрані контрольно-вимірювальні прилади (КВП) та обладнання автоматизації.

Крім того, було виконано низку розрахунків, необхідних для функціонування та безпеки системи. Розрахунок потужності генератора на основі потреби у електроенергії, а також враховано необхідність додаткової потужності для безперебійної роботи. Розрахунок потужності акумулятора, що забезпечує резервне живлення системи протягом 12 годин. Розрахунок інвертора, виходячи з максимального споживання електроенергії. Розрахунок безпечного автоматичного керування, що визначає умови захисту від ураження електричним струмом. Вибір автоматичного резерву та розрахунок параметрів кабелю, що забезпечує надійне живлення об'єкта.

Особлива увага була приділена вибору програмованого логічного контролера (ПЛК). Було обґрунтовано переваги використання ПЛК порівняно з релейною автоматикою, такі як гнучкість, інтеграція функцій, робота з дискретними та аналоговими сигналами, стандартизація та можливість віддаленого моніторингу. Було обрано та описано обладнання ПЛК від компанії Siemens (серії SIMATIC S7-300), включаючи блок живлення, контролер CPU 317-2 DP, модулі вводу-виводу та інші необхідні компоненти.

Таким чином, у розділі було системно підійдено до проектування автоматизованої системи управління ВЕУ, обґрунтовано вибір ключових технічних засобів та виконано необхідні розрахунки для забезпечення ефективної, надійної та безпечної роботи вітроенергетичної установки.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

## 5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

### 5.1 конфігурація ПЛК для системи управління ВЕУ

Для ефективного управління вітроенергетичною установкою (ВЕУ) необхідно підібрати надійний програмований логічний контролер (ПЛК) та відповідні модулі введення-виведення. Це дозволить забезпечити стабільну роботу системи, своєчасний моніторинг ключових параметрів та швидке реагування на зміни умов експлуатації. В якості основного контролера для ВЕУ було обрано Siemens SIMATIC S7-300 (CPU 317-2 DP). Ця модель відрізняється високою продуктивністю, модульною архітектурою та підтримкою промислових протоколів зв'язку, таких як PROFIBUS DP і MPI. Швидка обробка даних – процесор з тактовою частотою 48 МГц дозволяє виконувати команди за 0,05 мкс. Модульність – можливість підключення до 32 додаткових модулів (аналогових, цифрових, комунікаційних). Надійність – робота в широкому температурному діапазоні (від 0 до +60°C) та захист від перевантажень. Інтеграція з SCADA – підтримка PROFIBUS DP дозволяє підключатися до систем диспетчеризації для віддаленого моніторингу. Обрана конфігурація на базі Siemens S7-300 та супутніх модулів є оптимальним рішенням для автоматизації ВЕУ. Така система підходить для вітроустановок потужністю до 10 кВт і може бути адаптована для більш потужних промислових об'єктів.



Рисунок 5.1 – Вибірка контролера та модулів

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

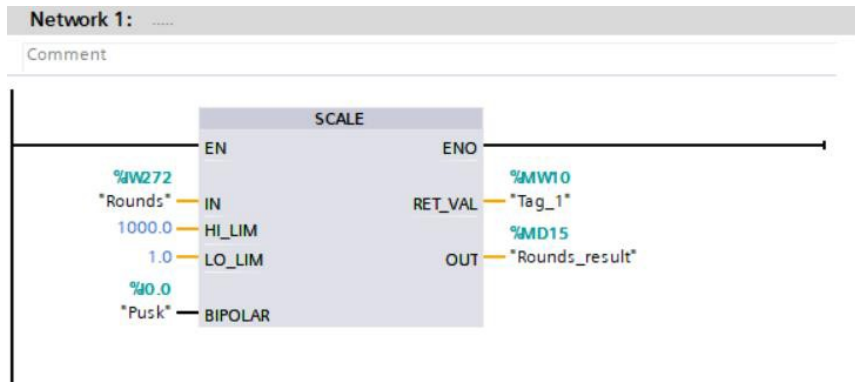


Рисунок 5.2 – Значення вимірювального лічильника

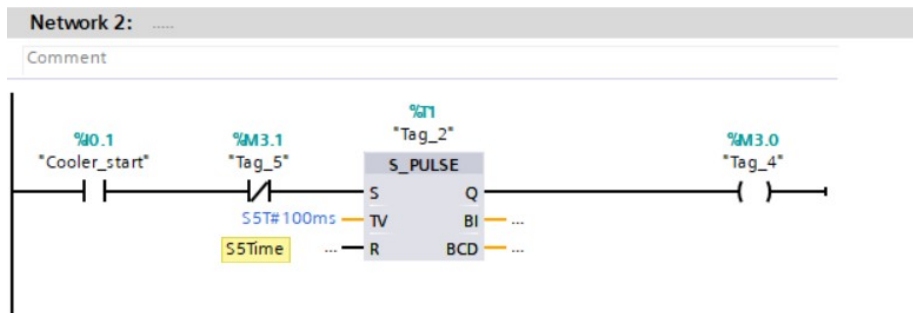


Рисунок 5.3 – Давач таймера прокручування на першій лопаті

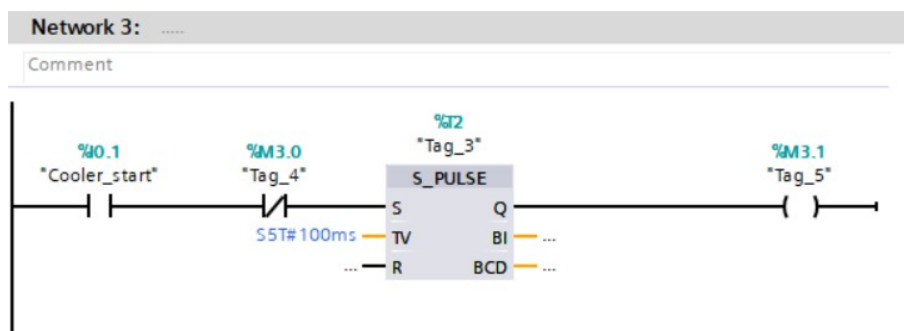


Рисунок 5.4 – Давач таймера прокручування на другій лопаті

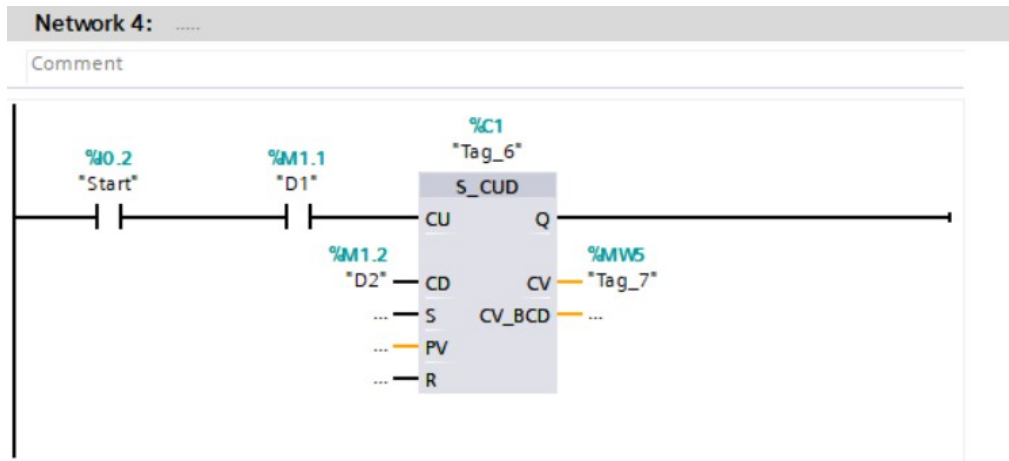


Рисунок 5.5 – Лічильник кількості оборотів за натисканням кнопки

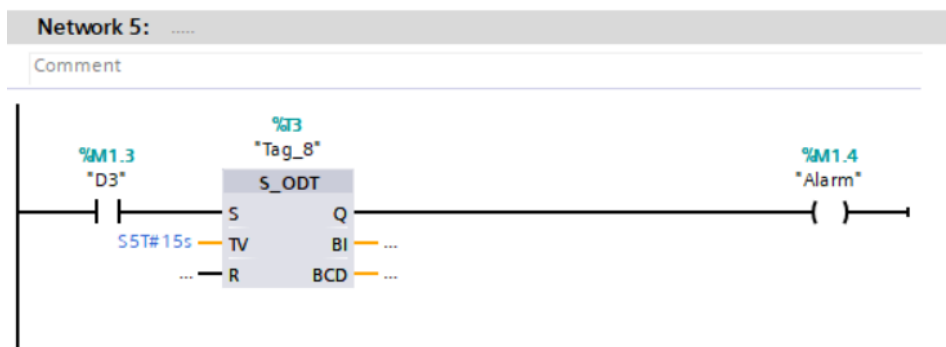


Рисунок 5.6 – Датчик таймера сигналізації через 15 секунд

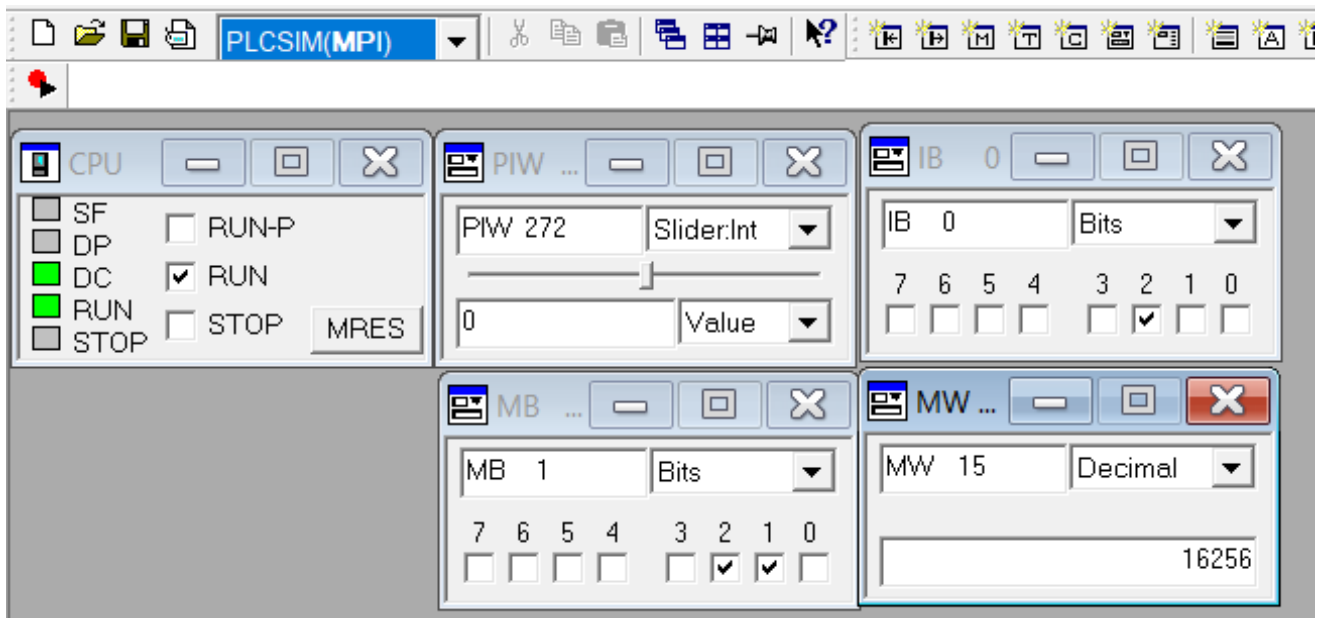


Рисунок 5.7 – Вікно симуляції

## 5.2 Побудова системи диспетчерського управління та збору даних (SCADA) для вітроенергетичної установки

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це програмний комплекс, призначений для диспетчерського управління та збору даних. Він дозволяє розробляти та забезпечувати функціонування систем, які в реальному або псевдореальному часі збирають, обробляють, відображають та архівують інформацію про об'єкт моніторингу чи управління. Сучасні SCADA-системи пропонують широкий спектр функціональних можливостей, серед яких: збирання та аналіз даних, візуалізація процесів, управління пристроями, архівування даних, оповіщення та багато іншого. Ці системи відіграють критично важливу роль у таких галузях, як промислова автоматизація, енергетика, транспорт тощо. Вони надають операторам та інженерам централізований контроль та моніторинг над складними системами та процесами, значно підвищуючи їх ефективність та надійність [5].

Таблиця 5.1 – Устаткування SCADA

№	Найменування обладнання	Тип і марка	Кількість
1	Блок живлення PS 307; 5A	6AG1 307-1EA80-0AA0	1
2	Стационарна панель оператора SIMATIC HMI Comfort	6AV21240UC020AX0	1
3	SIMATIC WINCC COMFORT V11 SP2 (ПО)	6AV2101-0AA01-0AA5	1

SCADA-системи, розроблені відповідно до концепції Totally Integrated Automation (TIA), мають кілька важливих властивостей.

Повна відповідність вимогам TIA. Такі SCADA-системи повністю інтегруються в єдину автоматизовану систему. Це дає змогу значно підвищити продуктивність, а також знизити інженерні та експлуатаційні витрати протягом усього життєвого циклу проекту.

Наочна візуалізація процесу. SCADA-системи надають широкий спектр інструментів для візуалізації, таких як поля введення/виведення, графіки, криві,

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

гістограми, текстова інформація та растрові зображення. Це дозволяє оперативно та наочно відобразити стан та параметри технологічного процесу.

SCADA-системи надають готові бібліотеки графічних об'єктів. Це значно спрощує розробку проєктів та дозволяє швидко створювати інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс. SCADA-системи забезпечують централізоване керування панелями оператора, включно з реалізацією алгоритмів енергозбереження на базі протоколу PROFIenergy. Це дозволяє оптимізувати енергоспоживання системи. Також SCADA надає зручний доступ до діагностичної інформації, усуваючи потребу у використанні програмного забезпечення STEP 7 для програмування контролерів.

Панелі операторів SIMATIC комфортної лінії ідеально підходять для широкого спектра завдань оперативного управління та моніторингу на локальному рівні, як у промисловому виробництві, так і в системах автоматизації будівель. Ці панелі підтримують розширений набір функцій людино-машинного інтерфейсу (HMI), що дозволяє: обмінюватися даними з іншими приладами SIMATIC HMI, здійснювати дистанційне обслуговування, реалізовувати алгоритми енергозбереження тощо.

Панелі з мембранною клавіатурою оснащені конфігурованими функціональними клавішами, які можуть активувати до 16 різних функцій та дій. Ці функціональні клавіші також можуть використовуватись як дискретні входи для периферійних пристроїв у мережах PROFINET IO або PROFIBUS DP.

Серед можливостей візуалізації та керування: візуалізація процесу, мультиплексування змінних, система повідомлень, архівування повідомлень та значень параметрів, управління рецептами, реєстрація та виведення повідомлень і звітів на друк, а також багатомовна підтримка.

Проектування панелей операторів серії SIMATIC Comfort Panel здійснюється за допомогою програмного забезпечення SIMATIC WinCC версії V11 (або вищих версій) з відповідною ліцензією Comfort. Для завантаження та зчитування створених проєктів використовуються вбудовані інтерфейси панелі оператора: Ethernet або USB.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

SIMATIC WinCC V11 є частиною програмного забезпечення TIA Portal V11. TIA Portal — це інтегроване середовище розробки, призначене для створення комплексних проєктів. Воно охоплює програмовані контролери SIMATIC, системи людино-машинного інтерфейсу SIMATIC HMI та приводи сімейства SINAMICS. У цьому середовищі підтримується навігація проєктами, реалізована єдина концепція використання бібліотек, централізоване управління даними та забезпечення їхньої повної узгодженості.

TIA Portal також дозволяє запускати необхідні редактори, зберігати проєкти, проводити діагностику та виконувати інші важливі функції. SCADA-системи зазвичай складаються з кількох взаємопов'язаних компонентів.

Датчики та виконавчі пристрої збирають дані про стан процесу чи обладнання. Датчики вимірюють фізичні параметри (наприклад, температуру, тиск, рівень), а виконавчі пристрої керують механізмами та системами.

Програмовані логічні контролери (ПЛК) - центральний елемент управління в SCADA-системах. ПЛК отримують дані від датчиків, обробляють їх і приймають рішення на основі заданих логічних алгоритмів. Вони також безпосередньо керують виконавчими пристроями.

Серверна частина системи, що відповідає за збір, обробку та зберігання даних, отриманих від ПЛК та інших джерел. Сервер також надає інтерфейс для операторів та інженерів, дозволяючи їм моніторити процеси та керувати системою.

Операторські панелі (HMI - Human-Machine Interface) - це пристрої, які забезпечують візуалізацію даних та інтерактивний інтерфейс для взаємодії операторів із системою. Через HMI оператори можуть переглядати дані, керувати процесами, відображати тренди та виконувати інші функції.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

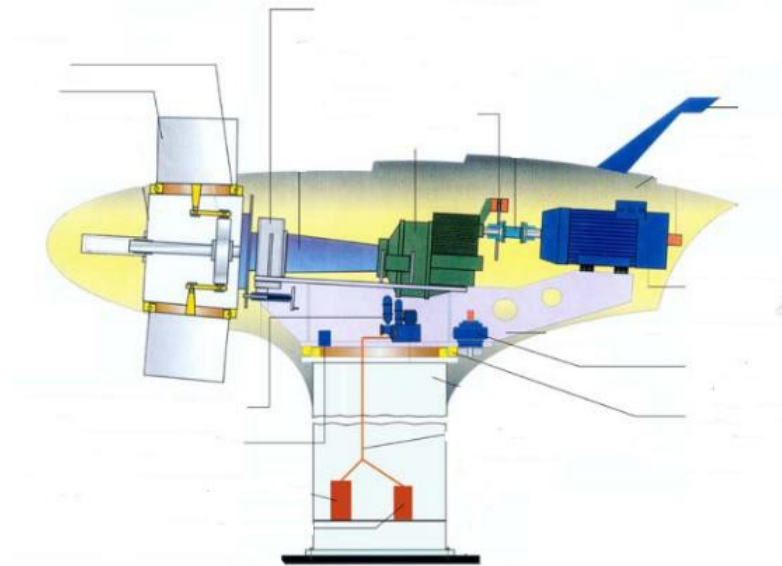


Рисунок 5.8 – Візуальний вигляд у системі SCADA

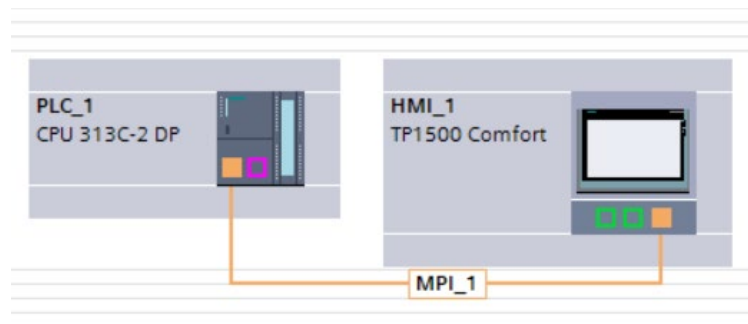


Рисунок 5.9 – Підключення CPU з панеллю HMI

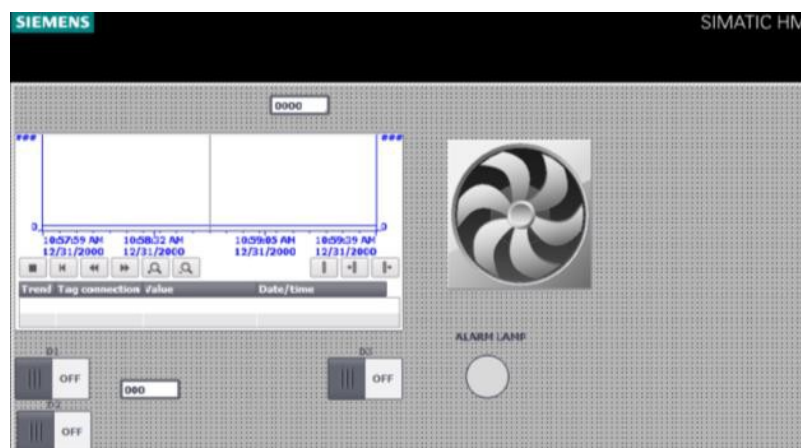


Рисунок 5.10 – Розташування зображень у панелі HMI

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

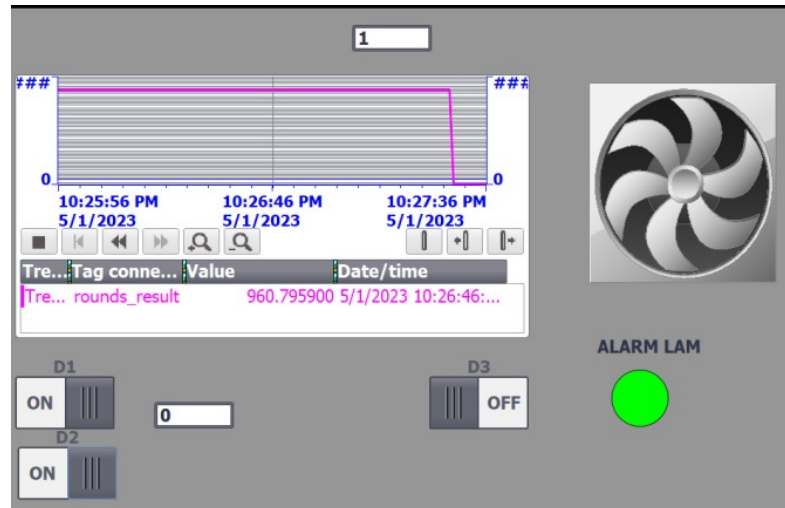


Рисунок 5.11 – Результат у панелі HMI

### Висновок до розділу

У цьому розділі було детально розглянуто розробку та реалізацію SCADA-системи для ефективного моніторингу та управління вітроенергетичною установкою (ВЕУ). Визначено ключові функції та переваги сучасних SCADA-систем, які забезпечують збір, обробку, візуалізацію та архівування даних у реальному часі.

Було обґрунтовано вибір обладнання для SCADA-системи, включаючи блок живлення, стаціонарну панель оператора SIMATIC HMI Comfort та програмне забезпечення SIMATIC WinCC Comfort. Особливу увагу приділено інтеграції системи в концепцію Totally Integrated Automation (TIA), що підвищує продуктивність та знижує експлуатаційні витрати.

Представлено компоненти SCADA-системи, такі як датчики, виконавчі пристрої, програмовані логічні контролери (ПЛК), SCADA-сервер та операторські панелі (HMI). Наведено візуальні приклади інтерфейсу SCADA-системи, що демонструють її можливості з моніторингу та управління процесами ВЕУ, а також підключення CPU до панелі HMI.

Таким чином, у розділі було успішно вирішено завдання створення надійної та функціональної SCADA-системи, що є важливою складовою для ефективного та безпечного функціонування вітроенергетичної установки.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дана бакалаврська робота присвячена підвищенню ефективності та надійності функціонування вітроенергетичних установок (ВЕУ) за рахунок застосування сучасних методів автоматизації та контролю. У роботі комплексно вирішено завдання з аналізу, проектування та вибору технічних засобів для автоматизованої системи управління ВЕУ.

Основними досягнення та результати роботи є наступні. Аналіз вітроенергетичного потенціалу та технологічних особливостей ВЕУ. Досліджено перспективи розвитку вітроенергетики в Україні, включаючи аналіз географічних умов, наявних об'єктів та потенціалу зростання. Проведено детальний розгляд конструкції, принципів роботи та класифікації ВЕУ, а також визначено ключові фактори, що впливають на їх ефективність (швидкість вітру, розмір вітроколеса, висота щогли).

Проведено систематизацію та опис різних типів генераторів (постійного та змінного струму, синхронних, асинхронних, машин подвійного живлення), що застосовуються у вітроенергетиці. Проаналізовано їхні характеристики та принципові схеми, що дозволило обґрунтувати вибір оптимального типу генератора для розроблюваної системи.

Розроблено багаторівневу архітектуру системи управління, що включає нижній (датчики), середній (ПЛК) та верхній (SCADA) рівні. Сформовано функціональну схему автоматизації, що відображає взаємодію всіх компонентів системи.

Детально підібрано контрольно-вимірювальні прилади (КВП), такі як перетворювачі температури, енкадери, датчики вітру та перетворювачі частоти, з обґрунтуванням їхніх технічних характеристик.

Виконано ключові інженерні розрахунки, включаючи визначення потужності генератора та акумуляторної батареї, вибір інвертора, а також розрахунки, пов'язані з безпечним автоматичним керуванням та вибором автоматичного вводу резерву. Ці розрахунки підтверджують ефективність та

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

безпеку запропонованих рішень.

Обґрунтовано вибір ПЛК Siemens SIMATIC S7-300 як центрального елемента системи автоматизації. Детально описано його переваги (продуктивність, модульність, надійність) та особливості інтеграції з іншими компонентами системи.

Описано принципи побудови та функціонування SCADA-системи для моніторингу та управління ВЕУ. Обґрунтовано вибір програмного забезпечення SIMATIC WinCC Comfort та операторської панелі SIMATIC HMI Comfort, що дозволяє забезпечити наглядну візуалізацію та централізоване управління технологічними процесами.

Запропоновані у роботі технічні рішення та архітектура системи автоматизації дозволяють значно підвищити ефективність, надійність та безпеку експлуатації вітроенергетичних установок. Розроблена система забезпечує точний контроль над ключовими параметрами ВЕУ, оперативне реагування на зміни умов експлуатації, а також можливість інтеграції в більш широкі енергетичні системи. Це сприяє подальшому розвитку відновлюваної енергетики в Україні та зменшенню залежності від традиційних джерел палива.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Бойко В.С., Гуменюк М.П. Відновлювані джерела енергії: підручник. – К.: Ліра-К, 2018. – 320 с.
2. Кравченко В.Ф. Вітроенергетика: теорія та практика. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 280 с.
3. Морозов Ю.М., Петренко В.О. Альтернативна енергетика: сучасні технології. – Харків: Фоліо, 2020. – 256 с.
4. Шевченко О.А. Автоматизовані системи управління в енергетиці. – К.: НТУУ "КПІ", 2017. – 180 с.
5. Гончарук В.І., Сидоренко Р.М. Автоматизація технологічних процесів у енергетиці. – Дніпро: Наука і освіта, 2019. – 210 с.
6. Лисенко Г.П. Генератори для вітроенергетичних установок: конструкції та експлуатація. – Одеса: Астропринт, 2021. – 145 с.
7. Ковальчук О.В. Моделювання енергетичних систем з відновлюваними джерелами. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 132 с.
8. Мельник П.С. Сучасні методи автоматичного регулювання в енергетиці. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2018. – 95 с.
9. Захарченко Ю.О. SCADA-системи в промисловій автоматизації. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 168 с.
10. Білецький А.В. Програмовані логічні контролери в енергетичних системах. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 200 с.
11. ДСТУ EN 61400-1:2019 Вітроенергетичні установки. Частина 1: Вимоги до проектування.
12. ДСТУ ISO 13849-1:2018 Безпека машин. Частина 1: Принципи проектування систем керування.
13. Іваненко В.М. "Оптимізація роботи вітроенергетичних установок з використанням ПД-регуляторів" // Відновлювана енергетика. – 2021. – № 3. – С. 45–52.
14. Петров К.Л. "Аналіз ефективності різних типів генераторів у ВЕУ" // Енергетика та автоматика. – 2020. – № 2. – С. 30–38.

					БР.АКПз-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89