**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

# Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації роботою вітряних турбін. Система автоматизованого регулювання навантаженням

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1512
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Теггур М.Х.

Керівник професор, доктор т. н. Пазюк Ю.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

Запоріжжя 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (бакалаврський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**З А В Д А Н Н Я**
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Теггур Малік Хосінович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації роботою вітряних турбін. Система автоматизованого регулювання навантаженням
керівник роботи Пазюк М.Ю, професор, доктор т. н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання навантаженням; розробка технічної документації; техніко-економічних показники; охорона праці, пожежна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 1 | професор, Пазюк М.Ю. | | |
| 2 | професор, Пазюк М.Ю. | | |
| 3 | професор, Пазюк М.Ю. | | |
| 4 | професор, Пазюк М.Ю. | | |
| 5 | професор, Пазюк М.Ю. | | |
| 6 | професор, Пазюк М.Ю. | | |

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| **1** | Аналіз існуючого рівня автоматизації | 21.04-27.04.26 | |
| **2** | Розробка схеми інформаційних потоків | 28.04-04.05.26 | |
| **3** | Розробка технічного завдання | 05.05-07.05.26 | |
| **4** | Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу | 08.05-10.05.26 | |
| **5** | Проєктування системи регулювання температури | 08.05-14.05.26 | |
| **6** | Розробка технічної документації | 15.05-18.05.26 | |
| **7** | Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності | 19.05-21.05.26 | |
| **8** | Розрахунок техніко-економічних показників | 22.05-23.05.26 | |
| **9** | Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки | 24.05-25.05.26 | |
| **10** | Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді | 26.05 – 10.06.26 | |

Студент _____ Малік ТЕГГУР
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Михайло ПАЗЮК
(підпис) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер _____ Андрій КОЛОСОК
(підпис) (ініціали та прізвище)

# РЕФЕРАТ

Теггур М. Х. Проект автоматизації роботою вітряних турбін. Система автоматизованого регулювання навантаженням.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», науковий керівник М.Ю. Пазюк, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є розробка та дослідження системи автоматизації вітряної турбіни з функцією автоматизованого регулювання навантаження.

У ході виконання роботи було проведено аналіз сучасного стану вітроенергетичної галузі України та визначено експлуатаційні зони ВЕУ залежно від швидкості вітру. Розроблено математичну модель динамічних режимів роботи вітротурбіни з урахуванням аеродинамічних характеристик ротора та параметрів синхронного генератора. Виконано параметричний синтез оптимального PID-регулятора контуру навантаження методом Ціглера-Ніколса, що дозволило забезпечити стабільний аперіодичний перехідний процес із часом регулювання 0,3 с. Обґрунтовано комплекс технічних засобів САУ на базі ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200. Розроблено функціональну та принципову електричну схеми підключення, а також реалізовано заходи з охорони праці, промислової, пожежної та екологічної безпеки. Розрахунок техніко-економічної ефективності підтвердив доцільність модернізації із терміном окупності проекту 6 років.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку джерел посилання з 42 найменувань, викладена на 68 сторінках машинописного тексту, включаючи 20 рисунків, 5 таблиць та 9 аркушів графічного матеріалу.

Ключові слова: вітроенергетична установка, автоматизація, регулювання навантаження, PID-регулятор, ПЛК, математичне моделювання

ЗМІСТ

ВСТУП ..... 6
1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 7
1.1 Вітроенергетична галузь України в сьогоденні ..... 7
1.2 Опис технологічного процесу вітрогенерації ..... 8
1.3 Технологічний опис об’єкта автоматизації ..... 15
1.4 Постановка задачі проєктування системи автоматизації ..... 18
2. ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 21
2.1 Загальні технічні та системні вимоги ..... 21
2.2 Функціональні вимоги до контурів автоматичного регулювання ..... 21
2.3 Вимоги до надійності та протиаварійного захисту ..... 24
2.4 Вимоги до інтеграції в енергосистему та допоміжних підсистем ..... 24
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ..... 26
3.1 Ідентифікація об’єкта керування ..... 26
3.2 Синтез САР і аналіз її функціонування ..... 28
3.3 Синтез оптимального регулятора методом Ціглера-Ніколса №1 ..... 32
4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ..... 36
4.1 Контур регулювання електромагнітного моменту генератора ..... 36
4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ ..... 38
4.3 Функціональна схема автоматизації ..... 45
4.4 Принципова схема з’єднання і підключення до ПЛК ..... 46
5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ..... 49
5.1 Охорона праці ..... 49
5.2 Вимоги до обладнання ..... 51
5.3 Заходи з електробезпеки ..... 53
5.4 Пожежна безпека ..... 54
5.5 Екологічна безпека функціонування вітроенергетичних установок ..... 55
6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ..... 58
ВИСНОВКИ ..... 62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ..... 65

# ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової енергетики характеризується стрімким переходом до відновлюваних джерел енергії, серед яких вітроенергетика посідає одне з провідних місць. Проте інтеграція вітрових електростанцій до загальної енергосистеми створює низку технічних викликів. Головними з них є стохастичний (непередбачуваний) характер вітрового потоку та нестабільність генерації електроенергії. Різкі коливання вітрового навантаження не лише знижують якість виробленої енергії, але й призводять до прискореного механічного зносу вузлів ковзання, редукторів та лопатей турбін.

У зв'язку з цим виникає гостра потреба у впровадженні високоефективних локальних систем автоматичного керування. Автоматизація роботи вітряних турбін, зокрема впровадження інтелектуальних систем автоматизованого регулювання навантаженням, дозволяє оптимізувати відбір потужності за різних анемометричних умов, мінімізувати динамічні удари на конструкцію установки та забезпечити стабільні параметри вихідної напруги. Таким чином, розробка та дослідження системи автоматизованого регулювання навантаження вітротурбін є актуальною науково-практичною задачею, спрямованою на підвищення надійності, енергоефективності та довговічності відновлюваних джерел енергії.

Метою роботи є розробка та дослідження системи автоматизації вітряної турбіни з функцією автоматизованого регулювання навантаження для забезпечення максимальної ефективності генерації та зниження механічних ризиків.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії вітру в електричну енергію та динамічні режими роботи вітроенергетичної установки.

Предмет дослідження – алгоритми, методи та технічні засоби автоматизованого регулювання навантаженням вітряної турбіни.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні алгоритму регулювання навантаження вітряної турбіни, що дозволяє підвищити точність підтримання номінальної потужності при поривах вітру.

# 1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 1.1 Вітроенергетична галузь України в сьогоденні

Вітчизняний сектор вітроенергетики демонструє стійку тенденцію до відновлення та розширення. Так, упродовж 2024 року енергосистема України поповнилася на 20,6 МВт нових потужностей, унаслідок чого сумарний потенціал галузі зріс до 1921,4 МВт (з урахуванням об'єктів на тимчасово окупованих територіях, за винятком АР Крим). Паралельно сформувався новий вектор розвитку – ринок відновлених (уживаних) вітрогенераторів, загальна потужність яких сягнула 32 МВт. Попри помірну динаміку приросту, 2024 рік відзначився масштабною підготовчою роботою для інтеграції потужних вітроелектростанцій (ВЕС), розгортання яких припадає на період 2025-2026 років [3].

У межах державних програм та ініціатив Міністерства енергетики України було проведено комплексний моніторинг, який підтвердив високу інвестиційну привабливість низки регіонів для зведення вітрових установок. Результатом обробки багаторічних метеорологічних спостережень стало створення Атласу вітрів України, що відображає географічний розподіл швидкостей вітрових потоків. Профільне міністерство оцінює загальний технічний потенціал вітрогенерації країни на рівні 140 ГВт. На основі цих розрахунків сформовано портфель інвестиційних проектів; зокрема, на поточному етапі розвитку у 2025 році заплановано введення в експлуатацію понад 800 МВт нових генеруючих потужностей. Стратегічні орієнтири галузі зафіксовані у профільній програмі розвитку до 2030 року, яка передбачає масштабування сумарної потужності ВЕС до 6,2 ГВт [7].

Географічні та кліматичні умови України є надзвичайно сприятливими для альтернативної енергетики, передусім у зонах із середньорічними показниками швидкості вітру понад 6 м/с. Дослідження свідчать, що сукупний ресурс сонячної та вітрової генерації в державі майже у 150 разів перевищує її поточне

енергоспоживання. Зважаючи на середню густину розміщення ВЕС (близько 10 МВт/км²) та наявність значних територіальних резервів, країна має реальні технічні передумови для розгортання вітрових парків загальною потужністю в кілька тисяч МВт [7], [9].

Флагманом практичної реалізації цих масштабних планів виступає компанія ДТЕК. На початку 2025 року керівництво компанії анонсувало масштабний інвестиційний проект обсягом 450 мільйонів євро, спрямований на добудову Тилігульської ВЕС та збільшення її потужності зі 114 МВт до 500 МВт [8]. На сьогодні це найбільш капіталомісткий приватний інвестиційний проект в українському енергосекторі з моменту початку повномасштабного вторгнення РФ у 2022 році. Вже в поточному 2026 році намічені раніше тенденції переходять у фазу активної практичної реалізації, що робить цей період переломним для вітчизняної зеленізації. На тлі адаптації законодавства до європейських стандартів фіксується запуск перших черг масштабних вітропарків у західних та центральних регіонах країни. Особлива увага приділяється впровадженню систем накопичення енергії, які працюють у синергії з ВЕС для стабілізації частоти в енергосистемі. Це підтверджує, що попри воєнні ризики, інвестиційний ландшафт України у сфері відновлюваної енергетики продовжує динамічно розвиватися.

Таким чином, попри складні макроекономічні та безпекові умови, вітроенергетична галузь України впевнено розвивається, виступаючи ключовим гарантом майбутньої енергетичної безпеки та декарбонізації економіки.

## 1.2 Опис технологічного процесу вітрогенерації

Енергія вітру стала бумом у світі, тому що немає палива, вітрова енергія також не вироблятиме радіації чи забруднення повітря. Вона перетворюється в механічну енергію, механічна енергія в електричну енергію обладнання. Загалом, це свого роду сонце як джерело тепла, щоб використовувати повітря як

робоче середовище теплового двигуна. Виробництво енергії вітру з використанням природної енергії. Відносний дизель-генератор. Але якщо екстрено використовувати для нього, або як дизельні генератори. Енергія вітру є резервним джерелом живлення, але її можна використовувати протягом тривалого часу.

Принцип виробництва енергії вітру полягає в тому, що сила вітру використовується для обертання лопатей вітряка, знову ж таки через машину росту швидкість обертання збільшиться, щоб генератор виробляв електроенергію. На основі поточної технології вітрових турбін, швидкість вітру становить близько трьох метрів на секунду (ступінь, до якої вітерець), може почати виробляти електроенергію.

Вітрогенератор (вітрова турбіна) – пристрій для перетворення кінетичної енергії вітру на електричну, що складається з вітрової турбіни, електрогенератора та допоміжного обладнання. Простіше кажучи, турбіна працює навпаки до вентилятора: замість використання електроенергії для переміщення повітря вона використовує вітер, щоб виробляти електроенергію.

За конструкцією вітрової турбіни вітрогенератори поділяються на:

1. Апарати з горизонтальною віссю (рис. 1.1) вимагають додаткового пристрою орієнтації та високої щогли, але характеризуються високим значенням коефіцієнту використання енергії вітру та відносно малими динамічними навантаженнями.



Рисунок 1.1 – Апарат з горизонтальною віссю.

Завдяки своїм перевагам отримали широке використання. Високе значення КІВ досягається за рахунок оптимізації профілів лопатей турбіни, що дозволяє отримати на лопатях значну підйомну силу, яка сприяє збільшенню крутного моменту.

До апаратів з горизонтальною віссю також належать так звані вітрильні турбіни, в яких лопаті турбіни є подібними до вітрил. Такі турбіни характеризуються значно меншим КІВ, але можуть працювати в умовах слабких вітрів, що досягається значною площею встановлених вітрил. Підйомна сила на лопатях таких турбін є незначною.

2. Апарати з вертикальною віссю (рис. 1.2) не вимагають пристроїв орієнтації відносно напрямку вітру.



Рисунок 1.2 – Апарат з вертикальною віссю

Довгий час суттєвим недоліком таких турбін у порівнянні з турбінами з горизонтальною віссю, крутний момент яких залишається незмінним протягом одного обороту, було те, що лопаті вертикальних турбін при обертанні створюють періодичні імпульси, що призводить до додаткових навантажень на

елементи їх конструкції. В подальшому цей недолік був усунутий шляхом гвинтового повороту лопаток турбіни (Турбіна Горлова тощо). Вертикальновісьові турбіни зустрічаються досить рідко і використовуються, як правило, у домашніх системах через порівняно низький рівень шуму при роботі. Проте існують проекти застосування таких генераторів у шельфових електростанціях.

Основні елементи гондоли в складі вітроенергетичної установки наведені на рис. 1.3.

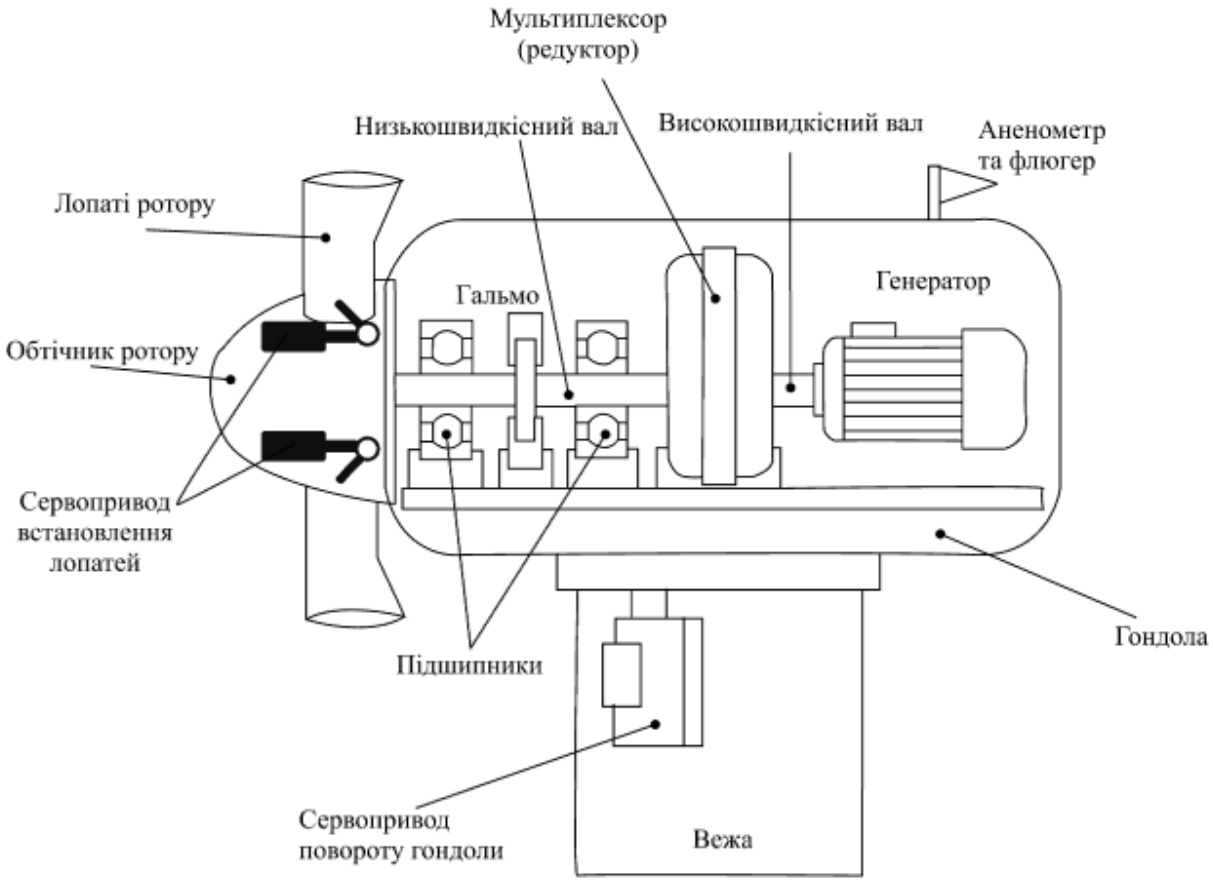



Рисунок 1.3 – Основні елементи гондоли в складі вітроенергетичної установки

Основні частини вітрової турбіни:

– фундамент – з’єднує вежу з основою, зазвичай із залізобетону;

– вежа – найбільша та найважча частина (50–150 м заввишки), чим вище, тим стабільніші вітрові умови;

– ротор – збирає енергію вітру й передає її у привідну систему;

– гондола – містить редуктор, вал і генератор, повертається у напрямку вітру.

Внутрішні компоненти турбіни:

– анемометр – вимірює швидкість вітру;

– лопаті – рухаються під дією вітру;

– гальма – зупиняють ротор у разі аварії.

– контролер – вмикає й вимикає турбіну залежно від швидкості вітру;

– редуктор – збільшує швидкість обертання з 30-60 об./хв. до 1000-1800 об./хв.;

– генератор – виробляє електроенергію;

– вали низької та високої швидкості – передають потужність від лопатей до генератора;

– система повороту – орієнтує турбіну за напрямком вітру.

Функціонування вітроенергетичної установки (ВЕУ) базується на послідовному перетворенні кінетичної енергії повітряного потоку в механічну енергію обертання ротора, яка надалі трансформується генератором в електричну. Механізм дії системи полягає в тому, що вітровий потік приводить у рух лопаті, закріплені на валу, передаючи обертальний момент на ротор генератора. Вироблений змінний струм із нестабільними параметрами надходить до контролера, де випрямляється в постійний струм, необхідний для заряджання акумуляторних батарей. На завершальному етапі накопичена енергія подається на інвертор, який перетворює постійну напругу на трифазну або однофазну змінну напругу стандартної частоти (з лінійними показниками 220/380 В) для подальшого розподілу через комутаційні апарати [25].

Ротор є одним із найбільш навантажених та відповідальних конструктивних елементів вітротурбіни. Еволюція вітроенергетичних технологій супроводжується стрімким збільшенням геометричних розмірів лопатей: якщо у 1980-х роках їхня довжина становила близько 8 м, то в сучасних

промислових наземних ВЕУ цей показник перевищує 40 м. Застосування передових методів комп'ютерного моделювання та аналізу напружено-деформованого стану дозволило оптимізувати геометрію лопатей, уникнувши пропорційного збільшення їхньої маси при масштабуванні. З метою підвищення міцності й жорсткості конструкції за одночасного зниження її ваги, у зонах максимальних механічних навантажень дедалі частіше використовують високоефективне вуглецеве волокно. Проте впровадження карбонових композитів потребує ретельного техніко-економічного обґрунтування, оскільки їхня вартість майже вдесятеро перевищує ціну традиційного скловолокна [26].

Режими роботи вітрогенератора критично залежать від динаміки повітряних мас. Більшість промислових турбін активуються при досягненні швидкості вітру порядку 5,4 м/с – цей поріг визначається як швидкість увімкнення (cut-in speed) (рис. 1.4).




Рисунок 1.4 – Графік залежності потужності вітрогенератора від швидкості вітру

Якщо швидкість повітряного потоку нижча за це значення, лопаті залишаються нерухомими, а установка споживає енергію на власні потреби для підтримання працездатності систем керування.

Максимальна ефективність та номінальна потужність ВЕУ досягаються в діапазоні швидкостей вітру від 12,5 м/с до 13,4 м/с, що відповідає зоні номінальної швидкості (rated speed). У разі подальшого зростання швидкості вітру понад 13,4 м/с активуються системи регулювання (наприклад, зміна кута атаки лопатей або електромагнітне гальмування) для обмеження обертів ротора та запобігання пошкодженню генератора і мультиплікатора. При досягненні критичної швидкості вітру (понад 26,8 м/с), що класифікується як швидкість вимкнення (cut-out speed), спрацьовує система аварійної зупинки, і робота вітрогенератора повністю припиняється задля збереження цілісності конструкції [25].

Ось перефразований варіант тексту, очищений від стилістичних неточностей (наприклад, замінено некоректний вираз «вихідний патрубок», який виник внаслідок помилки перекладу англійського output або подібного терміна, на «вихідний каскад/інтерфейс системи»), адаптований під академічний стиль дипломної роботи:

За останні два десятиліття аеродинамічні показники промислових вітротурбін зазнали суттєвої якісної модернізації. На сьогодні ефективність сучасних роторних систем сягає близько 80% від теоретично можливої межі відбору енергії повітряного потоку (межі Беца). Такого прогресу вдалося досягти завдяки впровадженню спеціалізованих аеродинамічних профілів, оптимізованих під конкретні умови експлуатації. Провідні виробники вітрогенераторів застосовують індивідуальне проектування геометрії лопатей для кожної окремої моделі турбіни. Ці профілі розробляються з розрахунком на максимізацію коефіцієнта корисної дії за низьких швидкостей вітру та ефективне обмеження аеродинамічних навантажень під час шквальних поривів. Крім того, сучасні конструктивні рішення спрямовані на зниження чутливості лопатей до забруднення передньої кромки пилом і брудом, що раніше призводило до

суттєвих втрат потужності. Попри високий рівень розвитку методів проектування роторів, цей напрям зберігає значний потенціал для подальших науково-технічних досліджень.

Управління режимами роботи ВЕУ забезпечується високотехнологічними контролерами, які інтегрують та обробляють сигнали з десятків первинних перетворювачів (датчиків). На основі цих даних здійснюється комплексне регулювання частоти обертання ротора, кута нахилу лопатей (pitch-control), електромагнітного моменту генератора, а також вихідних параметрів напруги та фази. На контролер також покладено функції забезпечення протиаварійного захисту, зокрема прийняття рішень щодо екстреної зупинки турбіни за критичних погодних чи технологічних умов.

Більшість сучасних вітроустановок функціонують у режимі змінної швидкості обертання. Система керування безперервно адаптує параметри генератора під поточну швидкість вітру, змінюючи частоту обертання ротора та динамічні характеристики трансмісії для досягнення максимальної енергоефективності. Робота на змінних обертах передбачає використання потужних статичних перетворювачів частоти, які узгоджують параметри генерованої електроенергії з частотою та напругою електричної мережі. Вихідний інтерфейс системи керування також забезпечує моніторинг мережевих параметрів, захист від внутрішніх і зовнішніх збоїв, контроль стабільності напруги та динамічну підтримку системи шляхом генерації або споживання реактивної потужності [24].

## 1.3 Технологічний опис об’єкта автоматизації

Об’єктом автоматизації у даному дипломному проекті виступає сучасна промислова вітроенергетична установка (ВЕУ) великої потужності, що функціонує у складі вітрової електростанції (ВЕС) та інтегрується в загальну електричну мережу. З розрахункової інженерної точки зору ВЕУ є складним

електромеханічним та аеродинамічним комплексом, основним технологічним призначенням якого є безперервне перетворення кінетичної енергії рухомих повітряних мас у механічну енергію обертання ротора з її наступною трансформацією силовим генератором в електричну енергію стандартної частоти та напруги.

Первинним елементом сприйняття енергії вітру є трилопатевий аеродинамічний ротор, закріплений на головному низькошвидкісному валу. Лопаті ротора мають спеціалізований геометричний профіль, що забезпечує оптимізацію відбору потужності за умов низької швидкості вітру та ефективне обмеження статичних навантажень під час шквальних поривів, а також мінімізує деструктивний вплив накопиченого пилу та бруду на аеродинамічні характеристики передньої кромки.

Головний технологічний процес протікає безпосередньо всередині рухомої гондоли, яка встановлена на вершині конічної щогли та здатна орієнтуватися у просторі за допомогою сервоприводів системи yaw-control. Обертальний момент від маточини ротора через низькошвидкісний вал передається на мультиплікатор (редуктор), який збільшує частоту обертання до номінальних значень, необхідних для коректної роботи генератора, хоча у сучасних безредукторних установках застосовується прямий привід на багатополюсні машини. Як основне силове обладнання генерації у проекті розглядається високотехнологічний синхронний генератор на основі високотемпературної надпровідності. Конструктивна архітектура цієї машини містить феромагнітне ярмо статора, статорну мідну обмотку, високотемпературну надпровідну котушку збудження на роторі, а також інтегровану кріогенну систему охолодження з вбудованим кріостатом та зовнішнім рефрижератором, що потребує прецизійного автоматичного контролю параметрів низькотемпературної експлуатації під час динамічних змін навантаження.

Перспективним напрямом розвитку потужних вітроенергетичних установок є застосування синхронних генераторів на основі високотемпературної надпровідності.

Схема синхронного генератора наведена на рис. 1.5.

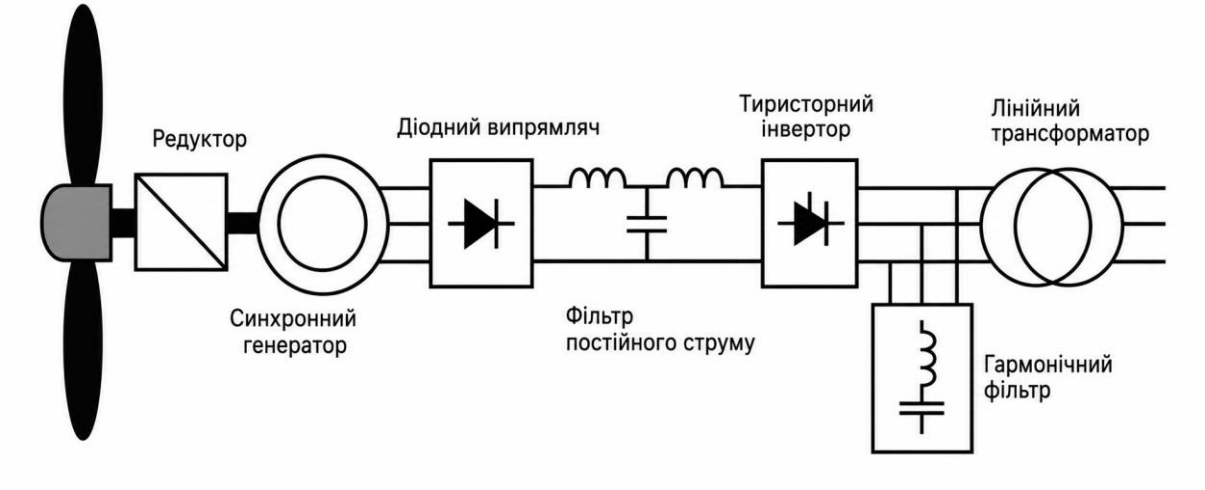



Рисунок 1.5 – Схема синхронного генератора

Взаємне просторове розташування вузлів статора, ротора, елементів редуктора (мультиплікатора) та інтегрованої системи охолодження створює складні інженерні задачі. Головна з них полягає у забезпеченні стабільної та надійної роботи високотемпературних надпровідних котушок в умовах екстремально низьких (кріогенних) експлуатаційних температур, що вимагає прецизійного автоматичного контролю параметрів охолодження під час динамічних змін навантаження ВЕУ [22].

Технологічний режим роботи об’єкта автоматизації критично залежить від поточної швидкості та напрямку вітрового потоку, що зумовлює наявність кількох виражених експлуатаційних зон.

1. Активація установки та початок генерації відбуваються при досягненні швидкості увімкнення (cut-in speed) порядка п'яти метрів за секунду, нижче якої лопаті залишаються нерухомими, а енергія споживається з мережі на власні потреби.

2. Номінальний режим роботи із максимальним коефіцієнтом корисної дії досягається в діапазоні швидкостей вітру від дванадцяти до тринадцяти метрів за секунду (rated speed), де генерується паспортна потужність установки. При подальшому зростанні швидкості повітряного масиву виникає загроза механічного та теплового перевантаження конструктивних елементів, що

вимагає включення активного автоматичного регулювання навантаження шляхом зміни кута атаки лопатей (pitch-control) або електромагнітного гальмування ротора.

3. При досягненні критичного порогу швидкості вимкнення (cut-out speed) понад двадцять шість метрів за секунду технологічний процес зупиняється системою протиаварійного захисту з повним флюгуванням лопатей задля збереження цілісності ВЕУ.

Вироблена генератором нестабільна за частотою та амплітудою напруга надходить до локального силового перетворювача частоти, де спочатку випрямляється в постійний струм для проміжного накопичення або живлення контурів керування, а потім інвертується у трифазну змінну напругу стандартної частоти п'ятдесят герц з лінійним показником триста вісімдесят вольт. Вихідний інтерфейс системи безперервно узгоджує параметри струму з вимогами національних мережевих кодексів, забезпечуючи динамічну підтримку реактивної потужності та захист від внутрішніх збоїв. Оскільки об’єкт функціонує в умовах стохастичного вхідного впливу та жорстких обмежень енергосистеми, він потребує побудови дворівневої системи автоматичного керування, яка в реальному часі інтегрує сигнали від десятків первинних перетворювачів напруги, струму, температури, вібрації, швидкості та напрямку вітру для формування оптимальних керуючих дій на виконавчі механізми.

## 1.4 Постановка задачі проєктування системи автоматизації

Ефективне керування сучасною вітроенергетичною установкою, що функціонує в умовах стохастичного вхідного впливу повітряних мас та жорстких обмежень з боку об'єднаної енергосистеми, вимагає створення прецизійної двоканальної системи автоматичного регулювання. Основним деструктивним чинником, що діє на об'єкт, є непередбачуваність і пульсація вітрового навантаження, яка викликає як коливання генерованої потужності, так і значні

динамічні удари по конструктивних вузлах установки. Особливу складність додає наявність інноваційного високотемпературного надпровідного синхронного генератора, стабільність роботи якого критично залежить від теплових режимів кріогенної підсистеми.

З огляду на це, метою даного дипломного проєкту є розробка високоефективної системи автоматизованого регулювання навантаженням вітряної турбіни на базі сучасних засобів мікропроцесорної техніки. Для досягнення поставленої мети в межах проєкту необхідно вирішити такий комплекс інженерних та науково-технічних задач:

1. Розробити комплексну динамічну модель вітротурбіни, яка враховує аеродинамічні характеристики лопатей, інерційність ротора, а також теплові й електромагнітні процеси у високотемпературному надпровідному генераторі за умов випадкових коливань швидкості вітру.

2. Розробити алгоритм пошуку точки максимальної потужності шляхом оптимізації частоти обертання ротора при слабкому та помірному вітрі (від швидкості увімкнення до номінальної).

3. Створити алгоритм стабілізації вихідної потужності на номінальному рівні в зоні сильного вітру за допомогою прецизійної зміни кута атаки лопатей (*pitch-control*).

4. Запроєктувати контур автоматичного повороту гондоли за напрямком вітру (*yaw-control*) для мінімізації косинусних втрат енергії.

5. Обґрунтувати структуру та розрахувати параметри законів регулювання (зокрема PID-контролерів) для контурів зміни кроку лопатей та моменту генератора з метою забезпечення стійкості й високої швидкодії системи при поривах вітру.

6. Підібрати первинні вимірювальні перетворювачі: датчики швидкості та напрямку вітру (анемометри, флюгери), датчики обертів, температури кріостата, вібрації щогли, а також трансформатори струму й напруги.

7. Обґрунтувати вибір промислового програмованого логічного контролера (ПЛК) з необхідною кількістю аналогових та дискретних

модулів введення-виведення.

8. Вибрати виконавчі механізми: сервоприводи кроку лопатей, електродвигуни повороту гондоли та статичний перетворювач частоти.

9. Скласти функціональну схему автоматизації, принципові електричні схеми контурів живлення, вимірювання та керування, а також схеми підключення зовнішніх проводок до ПЛК.

*Висновки.* У розділі виконано комплексний аналіз сучасного стану вітроенергетичної галузі України, детально досліджено фізико-технічні засади функціонування об’єкта автоматизації, наведено систематизований опис його конструктивних елементів та сформульовано чітку інженерну постановку задачі проєктування. Попри складні макроекономічні умови та безпекові виклики, сектор відновлюваної енергетики України демонструє динамічний розвиток. Масштабування потужностей ВЕС, активне залучення приватних інвестицій для модернізації існуючих вітропарків, а також розгортання інтегрованих систем накопичення енергії для стабілізації частоти в мережі підтверджують високу актуальність автоматизації локальних генеруючих одиниць як базового кроку до забезпечення декарбонізації та загальної енергетичної незалежності держави.

У ході дослідження технологічного процесу було чітко розмежовано та охарактеризовано основні експлуатаційні зони установки залежно від швидкості вітру, що безпосередньо впливає на логіку побудови майбутньої системи керування. Виявлено, що стохастичний характер вітрового потоку викликає нестабільність вихідної напруги генератора та зумовлює виникнення небезпечних динамічних ударів на трансмісію і щоглу.

Для нівелювання цих деструктивних чинників обґрунтовано необхідність реалізації дворівневої структури автоматизації, де нижній рівень на базі мікропроцесорного контролера реалізує швидкісні алгоритми зміни кута атаки лопатей та орієнтації гондоли, а також взаємодіє із силовим напівпровідниковим перетворювачем частоти для виконання вимог національних мережевих кодексів щодо генерації реактивної потужності.

# 2. ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 2.1 Загальні технічні та системні вимоги

Проєктована система автоматизованого регулювання навантаженням вітряних турбін має забезпечувати безперервний, надійний та ефективний контроль усіх технологічних параметрів вітроенергетичної установки в умовах тривалої автономної експлуатації. Базовою системною вимогою є побудова дворангової архітектури управління, де на нижньому рівні функціонує високопродуктивний промисловий програмований логічний контролер, а на верхньому – людино-машинний інтерфейс диспетчерського пункту.

Система автоматизації повинна мати високу живучість, стійкість до індустріальних завад, електромагнітних полів силового генератора та значних температурних коливань навколишнього середовища. Конструктивне виконання апаратних засобів, що розміщуються безпосередньо в гондолі ВЕУ, має відповідати підвищеному класу захисту від вологи, пилу та вібраційних навантажень, які виникають під час обертання потужного аеродинамічного ротора. Обмін даними між локальними мікропроцесорними компонентами та центральною SCADA-системою вітропарку має базуватися на спеціалізованому міжнародному протоколі IEC 61400-25, що гарантує високу швидкість, відкритість та уніфікацію інформаційних потоків.

## 2.2 Функціональні вимоги до контурів автоматичного регулювання

Головне функціональне призначення системи полягає в оптимізації відбору енергії вітру та захисті конструкції від перевантажень шляхом реалізації складних законів автоматичного керування в реальному часі. Система автоматизації зобов'язана безперервно обробляти сигнали з частотою опитування в кілька мілісекунд, що надходять від первинних вимірювальних

перетворювачів швидкості й напрямку вітру, обертів валів, струмів, напруг та температурних показників. У зоні низьких і помірних вітрових потоків від системи вимагається реалізація алгоритму пошуку точки максимальної потужності за допомогою динамічного коригування електромагнітного моменту надпровідного синхронного генератора. При переході у зону сильних вітрів критично важливою функціональною вимогою є забезпечення прецизійної роботи контуру зміни кроку лопатей.

Локальний контролер повинен обчислювати та формувати керуючі сигнали на сервоприводи pitch-системи для стабілізації вихідної потужності на паспортному номінальному рівні, мінімізуючи при цьому згинальні моменти на щоглу і маточину ротора під час різких шквальних поривів. Додатково на систему покладаються обов'язки автоматичної орієнтації гондоли за вітром за допомогою yaw-приводів для нівелювання косинусних втрат енергії.

Логіка роботи контурів автоматизації жорстко прив'язана до поточних технологічних режимів ВЕУ, які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Функціональні вимоги до алгоритмів керування за зонами роботи ВЕУ

| Швидкість вітру, V (м/с) | Назва технологічної зони | Головне завдання контуру автоматизації | Стан і поведінка виконавчих механізмів |
|---|---|---|---|
| V < 5,4 | Зона простою | Очікування робочих умов, мінімізація споживання енергії з мережі на власні потреби. | Лопаті зафлюговані (кут 90∘). Механічні гальма затиснуті або ротор у режимі вільного прокручування без генерації. |

Продовження табл. 2.1.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5,4 ≤V<12,5 | Зона часткового навантаження | Максимізація коефіцієнта використання енергії вітру (Ср→max) за допомогою алгоритму оптимізації моменту. | Кут атаки лопатей фіксований (0∘). Контролер ПЛК змінює частоту і момент генератора через інвертор для адаптації обертів ротора. |
| 12,5≤V≤13,4 | Перехідна зона | Плавний перехід від режиму оптимізації потужності до режиму її жорсткого обмеження. | Початок динамічного регулювання кута атаки лопатей. Генератор досягає номінального електромагнітного моменту. |
| 13,4<V≤26,8 | Зона повного навантаження | Стабілізація вихідної електричної потужності на рівні 100% номіналу, захист механічної частини від перевантажень. | Активне та безперервне регулювання кута лопатей (Pitch-control у діапазоні 0∘-30∘). Момент генератора підтримується константним. |
| V>26,8 | Зона штормового захисту | Безпечна аварійна зупинка установки для збереження цілісності конструкції. | Аварійний перевід лопатей у кут 90∘ (флюгер). Активація механічних гальм гальмування ротора. Поворот гондоли у безпечне положення. |

## 2.3 Вимоги до надійності та протиаварійного захисту

Оскільки об'єкт автоматизації є високовартісним та капіталомістким обладнанням, до системи автоматизації висуваються безкомпромісні вимоги щодо надійності, безвідмовності та безпеки за принципом fail-safe. Програмно-апаратний комплекс повинен містити глибоко інтегровані алгоритми протиаварійного захисту, здатні функціонувати повністю автономно навіть у разі повного знеструмлення власних потреб ВЕУ або повної втрати інформаційного зв'язку з диспетчером. При досягненні критичної швидкості вітру понад двадцять шість метрів за секунду, виявленні неприпустимого рівня вібрації щогли чи критичного перегріву обмоток надпровідного генератора, система повинна миттєво ініціювати аварійний зупиночний комплекс. Це передбачає автоматичне примусове переведення лопатей у флюгерне положення за рахунок локальних акумуляторних чи гідродинамічних накопичувачів енергії гондоли та активацію допоміжних механічних гальм ротора.

## 2.4 Вимоги до інтеграції в енергосистему та допоміжних підсистем

Сучасні мережеві кодекси висувають жорсткі вимоги до якості електричної енергії, що видається ВЕУ в загальну мережу, тому система автоматизації повинна здійснювати прецизійне керування силовим статичним перетворювачем частоти. АСУ ТП зобов'язана контролювати та підтримувати стабільну синусоїдальну напругу із частотою п'ятдесят герц, забезпечувати мінімальний коефіцієнт гармонійних спотворень та реалізувати функцію динамічного утримання установки в мережі під час короткочасних просадок напруги.

Окремою важливою вимогою для даного об'єкта є автоматизація кріогенного контуру високотемпературного надпровідного генератора, де мікропроцесорна система повинна з високою точністю контролювати роботу режератора та тиск у кріостаті для недопущення переходу обмоток у нормальний

провідний стан. Нарешті, програмне забезпечення системи має задовольняти вимогам екологічної безпеки, що включає автоматичне зниження кутової швидкості ротора в нічні години для обмеження акустичного шуму та реалізацію алгоритму запобігання ефекту динамічного миготіння тіней.

*Висновки.* У цьому розділі сформовано комплекс системних та функціональних вимог до проєктувальної АСУ ТП вітроенергетичної установки. Обґрунтовано необхідність побудови дворангової архітектури управління, де нижній рівень на базі промислового ПЛК забезпечує збір даних і швидкісне регулювання, а верхній рівень реалізує функції SCADA-диспетчеризації. Для уніфікації інформаційних потоків визначено обов'язковість підтримки міжнародного протоколу стандарту IEC 61400-25.

На основі розробленої параметричної таблиці типізовано логіку роботи системи за п'ятьма основними вітровими зонами. Визначено жорсткі вимоги до швидкодії та точності трьох базових контурів керування: зміни кроку лопатей, орієнтації гондоли та оптимізації моменту генератора. Сформульовано суворі критерії надійності системи за принципом fail-safe для забезпечення автономного протиаварійного захисту та переведення турбіни у безпечний флюгерний режим при штормовому вітрі або втраті живлення.

Окреслено вимоги щодо інтеграції ВЕУ в енергомережу згідно з мережевими кодексами, що передбачає прецизійне керування інвертором для стабілізації частоти і напруги. Також враховано специфічні вимоги до автоматизації кріогенного контуру надпровідного генератора та виконання екологічних нормативів щодо обмеження шуму й миготіння тіней. Сформовані вимоги є повним технічним завданням для подальших етапів розробки і синтезу регуляторів.

# 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

## 3.1 Ідентифікація об'єкта керування

Використання імітаційного моделювання на етапі проектування складних систем управління дозволяє значно скоротити витрати на дослідження, розробку та випробування, а також суттєво зменшити час розробки виробу [28].

Модель вітряка представлена наступними рівняннями. Диференційне рівняння для опису обертального руху вітряка:

$$\frac{J}{d\omega/dt} = M_a - M_{em} - \mathrm{M_c}, \tag{3.1}$$

де J – момент інерції системи;

c – теплоємність повітря, яка дорівнює 1,2 кДж/м$^3$;

$M_a$ – аеродинамічний момент вітряка;

$M_{em}$ – електромагнітний момент генератора;

$M_c$ – момент опору втрат, який враховує тертя та інші втрати.

Аеродинамічний момент ротора рівний:

$$\mathrm{M_a} = \frac{\mathrm{C_p}(Z)\rho S V^2 \omega}{2}, \tag{3.2}$$

де $C_P(Z)$ – КВЕВ (залежить від швидкості Z);

ρ – густина повітря;

V – швидкість вітру;

S – площа, яку обслуговує вітер;

ω – кутова швидкість вітряка.

Тоді аеродинамічна потужність дорівнює:

$$P_a = \frac{C_p(Z)\rho S V^3}{2}, \qquad (3.3)$$

Залежність ($C_p$) від швидкості Z досить добре апроксимується функцією виду:

$$C_p(Z) = (c_1 Z - c_2) \cdot e^{c3Z+c4}, \qquad (3.4)$$

де ($c_1$,…, $c_4$) – коефіцієнти, вибрані для заданої конструкції вітряка за відомою аеродинамічною характеристикою; швидкість Z визначається рівнянням Z = ω·r/V. Графік залежності безрозмірного коефіцієнта ($C_p$) від швидкості Z (безрозм.) представлений на (рис. 3.1).

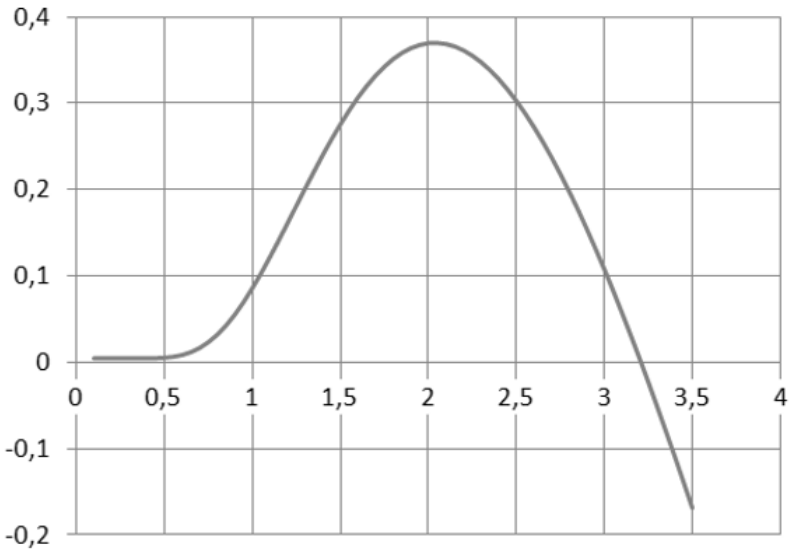



Рисунок 3.1 – Залежність КВЕВ від швидкохідності *Z*

Момент опору на валу визначається як $M_c$ = РМ ω, де РМ – механічна потужність на валу генератора. З використанням заданої залежності коефіцієнта використання енергії вітру від швидкості вітроколеса, була встановлена

залежність аеродинамічної потужності від швидкості вітру та частоти обертання ротора.

Графік розподілу аеродинамічної потужності ротора в залежності від швидкості вітру та частоти обертання наведений на (рис. 3.2).

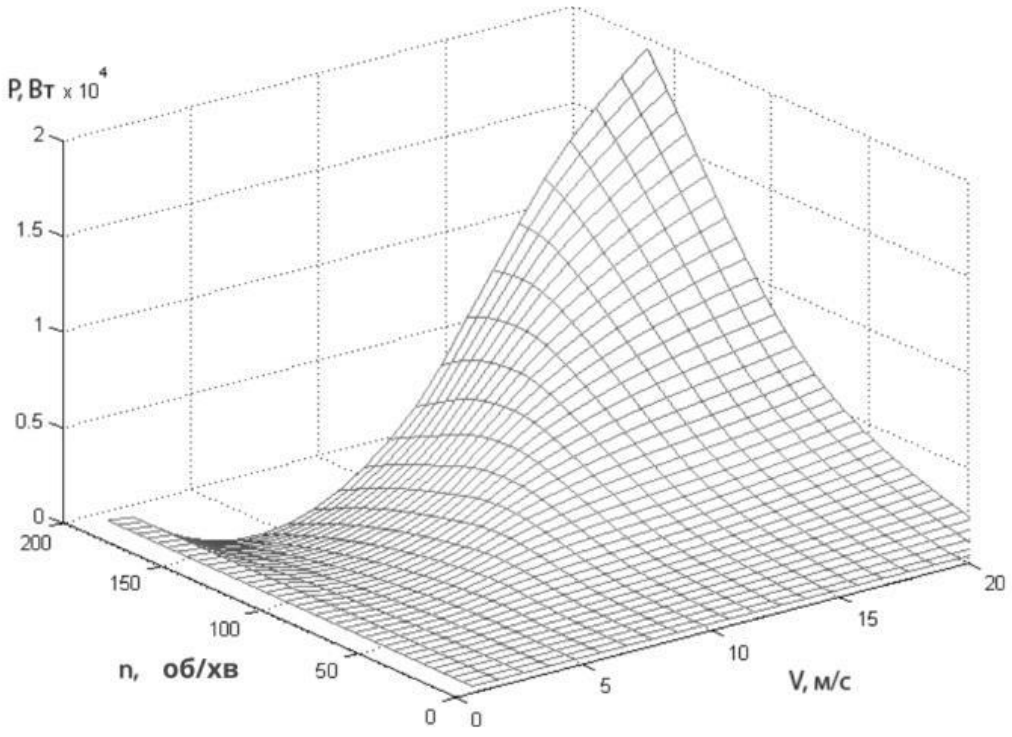
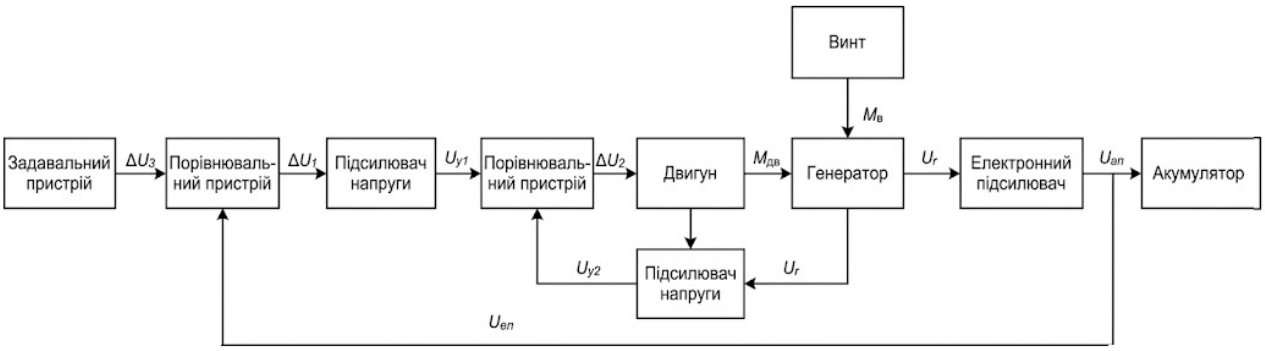



Рисунок 3.2 – Графік розподілу потужності ротора в залежності від швидкості вітру та частоти обертання

З цього графіку можна зробити висновок, що для будь-якої заданої швидкості вітру існує частота обертання ротора, при якій потужність вітроенергетичної установки буде максимальною [11].

## 3.2 Синтез САР і аналіз її функціонування

На (рис. 3.3) представлена структурна схема системи автоматичного регулювання.




$U_З$ – задавальний пристрій; $U_{еп}$ – напруга елекронного підсилювача (вихідний сигнал); $\Delta U_1$ – помилка неузгодженості; $\Delta U_2$ – шунтований сигнал; $М_{дв}$ – момент двигуна; $М_в$ – момент вітряка; $U_{y1}$ – напруга з підсилювача; $U_{y2}$ – напруга з підсилювача

Рисунок 3.3 – Структурна схема системи вітроенергетичної установки в системі автономного електропостачання

У схемі (рис. 3.3) задавальний сигнал напруги $U_З$ порівнюється з вихідним сигналом $U_{еп}$, та його похибка неузгодження $\Delta U_1$ підсилюється. Після чого $\Delta U_1$ шунтується за допомогою місцевого негативного зворотного зв'язку для фільтрації перешкод і діє на двигун. Далі момент від двигуна $М_{дв}$ взаємодіє з моментом, що надходить від винта $М_в$, що генерується вітром, і їх сумарний момент М подається на генератор. Посилена напруга $U_{еп}$ якого заряджає акумулятор і подається на зворотний зв'язок [21], [22].

Лінеаризоване рівняння елементів системи.

Двигун:

$$\Delta U_2 = \frac{0{,}1dM}{dt} + M_{дв}, \tag{3.5}$$

$$G = \frac{M_{дв}}{\Delta U_2} = \frac{1}{0{,}1s + 1}, \tag{3.6}$$

Підсилювач напруги №1:

$$U_{y1} = 20 \cdot \Delta U_1, \tag{3.7}$$

$$G = \frac{U_{y1}}{\Delta U_1} = \frac{20}{1}, \tag{3.8}$$

Підсилювач напруги №2:

$$U_{y3} = 3 \cdot \Delta U_{\text{г}}, \tag{3.9}$$

$$G = \frac{U_{y2}}{U_{\text{г}}} = \frac{20}{1}, \tag{3.10}$$

Електронний підсилювач:

$$U_{\text{еп}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{г}}, \tag{3.11}$$

$$G = \frac{U_{\text{еп}}}{U_{\text{г}}} = 2, \tag{3.12}$$

Генератор:

$$\frac{dU_{\text{г}}}{dt} = 0{,}5M, \tag{3.13}$$

$$sU_{\text{г}} = 0{,}5\text{M} \tag{3.14}$$

$$G = \frac{U_{\text{г}}}{\text{M}} = \frac{0{,}5}{s}, \tag{3.15}$$

На (рис. 3.4) представлена схема замкнутої системи автоматичного регулювання, що реалізується в середовищі MatLab.

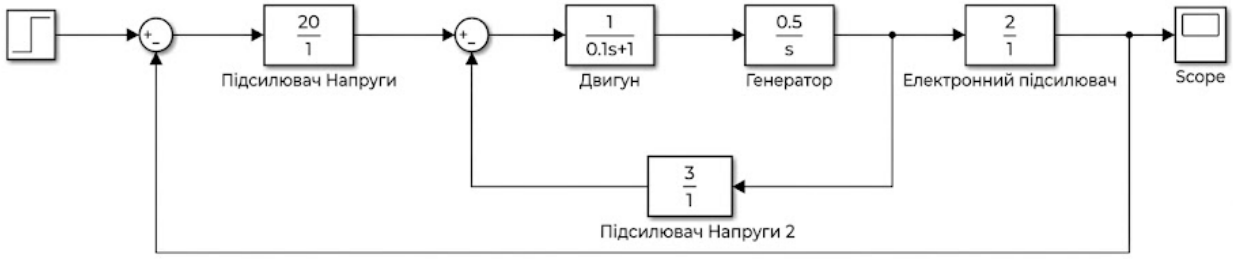



Рисунок 3.4 – Структурна схема замкнутої системи вітроенергетичної установки в системі автономного електропостачання

Для замкнутої системи еквівалентна передаточна функція буде дорівнювати:

$$W(s) = \frac{20}{0{,}1 \cdot s^2 + s + 21{,}5}, \tag{3.16}$$

Нулі і полюси замкнутої системи в MATLAB:

```
>> zero(G)
ans =
0×1 empty double column vector
>> pole(G)
ans =
-5.0000 +13.7840i
-5.0000 -13.7840i
```

Еквівалентна передаточна функція для розімкнутої системи:

$$W(s) = \frac{20}{0{,}1 \cdot s^2 + s + 1{,}5}, \tag{3.17}$$

На (рис. 3.5) представлена схема розімкнутої системи автоматичного регулювання, що реалізована в середовищі MATLAB.

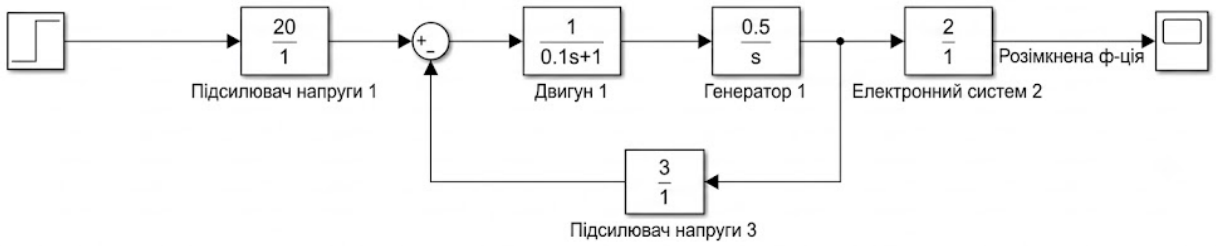



Рисунок 3.5 – Структурна схема розімкнутої системи вітроенергетичної установки в системі автономного електропостачання

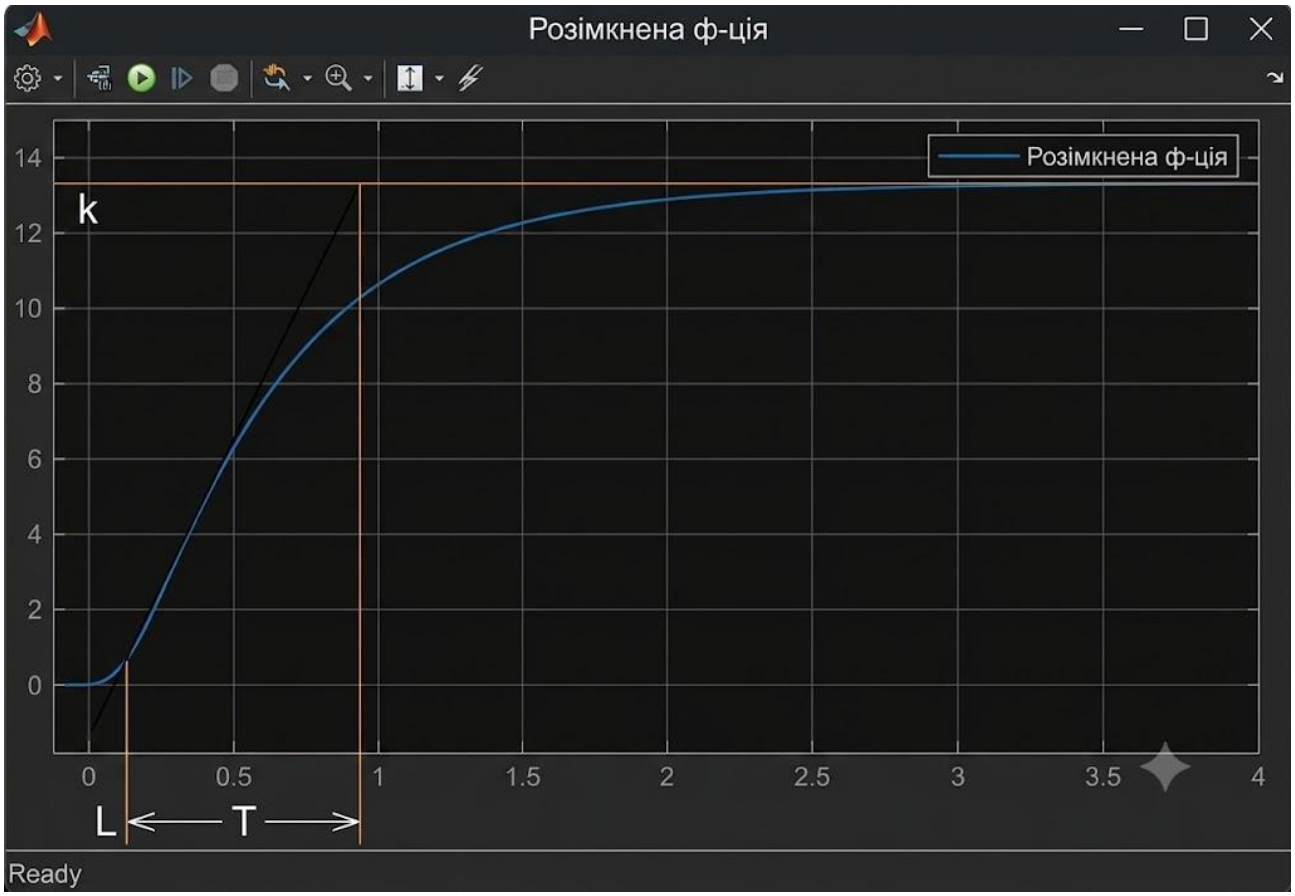
Нулі і полюси розімкнутої передаточної функції:

```
>> zero(G)
ans =
0×1 empty double column vector
>> pole(G) 36
ans = -8.1623
-1.8377
```

## 3.3 Синтез оптимального регулятора методом Ціглера-Ніколса №1

Щоб синтезувати регулятор, необхідно використовувати метод Ціглера-Ніколса №1, оскільки перехідний процес розімкнутої системи вітроенергетичної установки стійкий [31].

Необхідно знайти параметри k, L, T за графіком перехідного процесу (рис.3.6).




k – коефіцієнт передачі, k = 13,3 ; L – стала часу, L = 0,15;

T – час затримки, T = 0,65

Рисунок 3.6 – Параметри регулювання САР

За графіком на (рис. 3.6) визначено, що Для знаходження параметрів P, PI, PID регулятора за першим методом Ціглера-Ніколса використовуються формули в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Формули для обчислення параметрів регуляторів

| | $K_p$ | $T_i$ | $T_d$ |
|---|---|---|---|
| P | $\frac{T}{k \cdot L}$ | - | - |
| PI | $0{,}9 \cdot \frac{T}{k \cdot L}$ | $3{,}33L$ | - |
| PID | $1{,}2 \cdot \frac{T}{k \cdot L}$ | 2L | 0,5L |

$P$ – регулятор:

$$K_p = \frac{0{,}65}{13{,}3 \cdot 0{,}15} = 0{,}326, \quad (3.18)$$

$PI$– регулятор:

$$K_p = 0{,}9\ \frac{0{,}6}{13{,}3 \cdot 0{,}15} = 0{,}293, \quad (3.19)$$

$$T_i = 3{,}33 \cdot 0{,}15 = 0{,}50\ c \quad (3.20)$$

$PID$– регулятор:

$$K_p = 1{,}2\ \frac{0{,}65}{0{,}391 \cdot 0{,}15} = 0{,}391, \quad (3.21)$$

$$T_i = 2 \cdot\ 0{,}15 = 0{,}30 \quad (3.22)$$

$$T_d = 0{,}5 \cdot\ 0{,}15 = 0{,}075 \quad (3.23)$$

Перехідні процеси наведені на рисунку 3.7.

Перехідний процес замкнутої системи без регулятора (синій тренд) має найменший час наростання – 0,15 с, найбільше перерегулювання – 22% у порівнянні з іншими перехідними процесами. Система є стійкою, але недостатньо точною.

Перехідний процес системи з Р-регулятором (червоний тренд) характеризується одним коливанням і найбільшою похибкою, що встановлюється – 0,19. Система залишається стійкою, та її точність низька.

Перехідний процес замкнутої системи з PI-регулятором (зелений тренд) має нульову похибку, що встановлюється. Проте порівняно із замкнутою системою без регулятора його час наростання більший – 0,34 с. Система стійка

та точна.

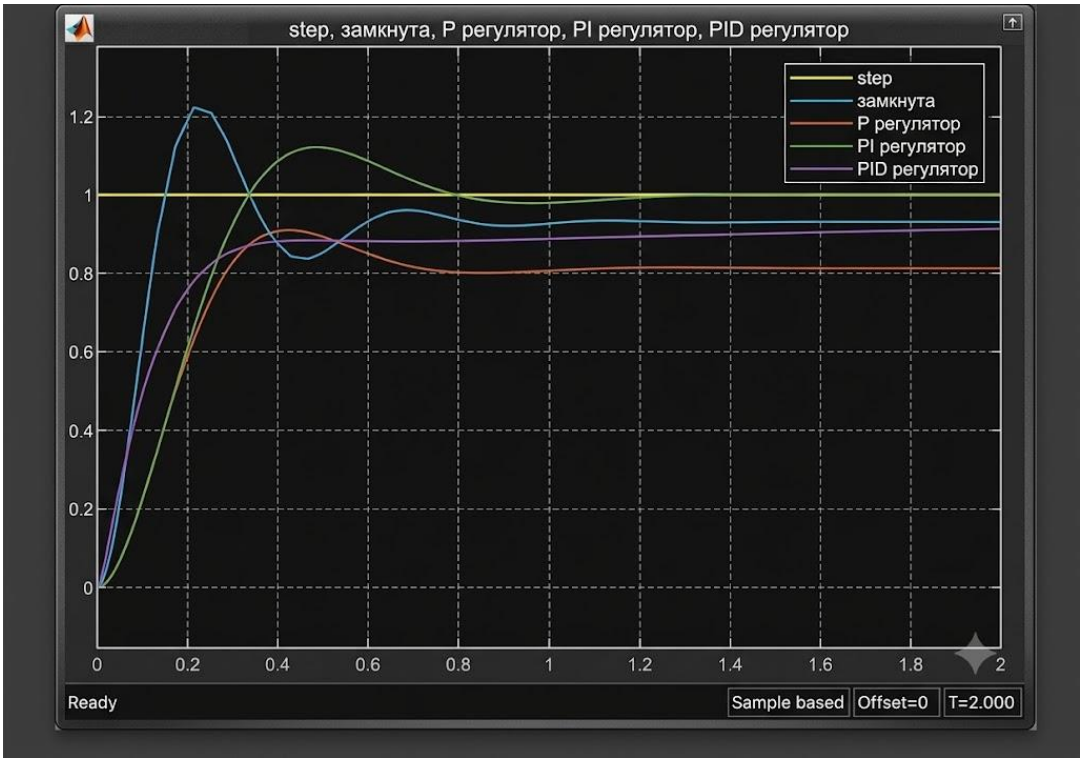



Рисунок 3.7 – Перехідні процеси P, PI, PID регуляторів

Перехідний процес замкнутої системи з PID-регулятором (фіолетовий тренд) є стійким, точним і монотонним, так як не має коливань, також має найменший час регулювання – 0,3 с.

*Висновки.* Порівняльний аналіз перехідних процесів показав, що замкнута система без регулятора є недостатньо точною і має високе перерегулювання (22%). Застосування P-регулятора не вирішує проблему точності, залишаючи статичну похибку на рівні 0,19. PI-регулятор забезпечує нульову похибку, але має більший час наростання (0,34 с) та схильність до коливальності.

Оптимальним для системи автоматичного регулювання вітроенергетичної установки є PID-регулятор (фіолетовий тренд). Він поєднує в собі переваги високої швидкодії (час регулювання – 0,3 с), абсолютної точності (статична похибка дорівнює нулю) та аперіодичного (монотонного) характеру перехідного процесу. Це дозволяє ефективно демпфувати динамічні навантаження на елементи вітроколеса і забезпечує стабільну якість генерованої електроенергії за умов змінної швидкості вітру.

# 4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ

## 4.1 Контур регулювання електромагнітного моменту генератора

Електронний підсилювач ($U_{еп}$) та система зворотного зв'язку керують електричним навантаженням генератора. Змінюючи струм навантаження (через силову електроніку або підсилювач), система змінює електромагнітний момент $M_{em}$. Це безпосередньо впливає на частоту обертання ротора ω і дозволяє утримувати систему в точці максимальної потужності.

Комплектація нижнього рівня дворангової АСУ ТП включає:

1. Контролер (ПЛК): Оскільки потрібне швидкісне регулювання (час перехідного процесу 0,3 с, ПЛК повинен мати цикл виконання програми не більше 1...5 мс та вбудований апаратний або програмний блок PID. (Siemens S7-1200/S7-300 з модулями технологічних функцій).

2. Модулі аналогового вводу-виводу (AI/AO): аналогові входи (AI) швидкісні канали для зчитування напруги зворотного зв'язку $U_{еп}$ та вихідної напруги генератора $U_г$ (стандарти сигналів 0...10 В або 4...20 мА). Для зчитування частоти обертання ω знадобиться модуль високошвидкісного лічильника (HSC) для підключення енкодера.

3. Виконавчий пристрій (електронний підсилювач / інвертор / керуючий контролер заряду): силовий напівпровідниковий перетворювач (на базі MOSFET/IGBT транзисторів), який приймає аналоговий сигнал керування від ПЛК (0...10 В) і регулює струм збудження або струм навантаження генератора, змінюючи тим самим електромагнітний момент $M_{em}$.

Структурна схема контуру регулювання навантаження ВЕУ наведена на рисунку 4.1.

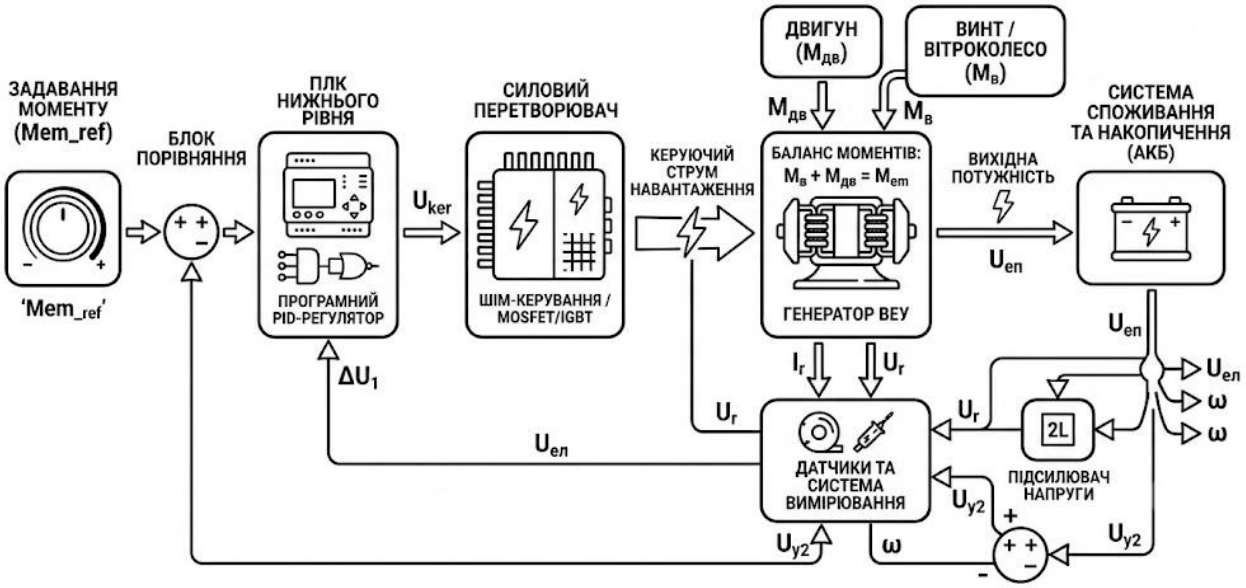



Рисунок 4.1 – Структурна схема контуру регулювання навантаження ВЕУ

Позначення напруг (U), які використовуються у вашій системі автоматичного регулювання (САР):

– $U_З$ (або $Ur_{ef}$) – задавальна напруга. Це еталонний (вхідний) сигнал від задавального пристрою, який визначає необхідний рівень напруги, що його має підтримувати або згенерувати система.

– $\Delta U_1$ – перша помилка неузгодженості (похибка). Різниця між задавальною напругою ($U_З$) та фактичною вихідною напругою системи ($U_{еп}$), що надходить через головний зворотний зв'язок. Вона визначає, наскільки реальна напруга відхилилася від норми.

– $U_{y1}$ – напруга з першого підсилювача. Сигнал, отриманий після підсилення першої похибки ($\Delta U_1$). Цей сигнал є вхідним для другого (внутрішнього) контуру регулювання.

– $\Delta U_2$ – друга помилка неузгодженості (шунтований сигнал). Різниця між підсиленою напругою керування ($U_{y1}$) та напругою місцевого зворотного зв'язку ($U_{y2}$ ). Вона безпосередньо діє на привідний двигун.

– $U_{y2}$ – напруга з другого підсилювача. Сигнал внутрішнього (місцевого) негативного зворотного зв'язку. Він формується шляхом підсилення напруги

генератора або двигуна і слугує для стабілізації внутрішнього контуру та фільтрації перешкод.

– $U_г$ – Вихідна напруга генератора. Реальна напруга, яку виробляє генератор ВЕУ під час обертання ротора під дією сумарного моменту.

– $U_{еп}$ – напруга електронного підсилювача. Фінальна посилена напруга на виході системи, яка безпосередньо йде на заряджання акумулятора і подається в головний (зовнішній) ланцюг зворотного зв'язку на перший суматор.

– $U_{an}$ – напруга акумулятора (навантаження). Напруга безпосередньо на клемах акумуляторної батареї (АКБ) під час її заряджання або живлення автономної мережі.

## 4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ

Для практичної реалізації розробленої системи автоматичного регулювання (САР) контуру електромагнітного моменту та навантаження вітроенергетичної установки (ВЕУ) необхідно здійснити вибір комплексу технічних засобів (КТЗ). Проєктована САУ базується на дворанговій архітектурі управління, яка відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

Нижній рівень (локальний контроль та керування): реалізується на базі мікропроцесорного програмованого логічного контролера (ПЛК), який здійснює високошвидкісне опитування датчиків, обробку сигналів за допомогою алгоритму та видачу керуючих впливів у реальному часі.

Верхній рівень (диспетчеризація та моніторинг): забезпечує SCADA-систему для оперативного контролю, архівації параметрів, візуалізації перехідних процесів та передачі даних за стандартом IEC 61400-25.

1. Програмований логічний контролер (ПЛК).

Для забезпечення жорстких вимог щодо швидкодії (отриманий час регулювання контуру становить 0,3 с) та точності, ПЛК повинен мати цикл

виконання робочої програми у межах 1,5 мс та вбудовані апаратні модулі обробки аналогових сигналів.

Промисловий контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC) (рис. 4.2).




Рисунок 4.2 – Промисловий контролер Siemens SIMATIC S7-1200

Дане процесорне модульне рішення має високу обчислювальну здатність, підтримує апаратне виконання технологічних функцій (включаючи програмні блоки PID_Compact з автоналаштуванням). Наявність інтегрованого інтерфейсу PROFINET (Ethernet-основа) дозволяє легко інтегрувати ВЕУ у верхній ранг системи (SCADA) та організувати передачу даних за протоколом IEC 61400-25 через технологічні шлюзи.

Контролер має високі обчислювальні характеристики, що дозволяє без затримок виконувати складні матричні та диференційні обчислення (алгоритми фільтрації Калмана та PID-регулювання):

– робоча пам'ять – 100 Кбайт, що повністю перекриває об'єм коду локального PID-регулятора та логіки п'яти вітрових зон;

– завантажувальна пам'ять – 4 Мбайт (із можливістю розширення за допомогою карт пам'яті SIMATIC Memory Card до 32 Гбайт) для зберігання логів аварій та архівів роботи;

– енергонезалежна пам'ять – 10 Кбайт для збереження налаштувань, когнітивних коефіцієнтів регулятора та лічильників мотогодин при раптовому зникненні живлення;

– час виконання однієї логічної операції становить всього 0,08 мкс, а операцій із рухомою комою (наприклад, розрахунок математичної моделі Ср(Z)) – 2,3 мкс. Це гарантує цикл задачі керування в межах 1-2 м, що на два порядки швидше за розрахований час регулювання системи (0,3 с).

2. Вимірювальні перетворювачі та датчики.

Контур регулювання моменту потребує безперервного моніторингу трьох базових параметрів: вихідної напруги генератора $U_г$, напруги на акумуляторі (навантаженні) $U_{еп}$, струму навантаження $I_г$, а також частоти обертання ротора $\omega$.

Датчики напруги ( $U_г$, $U_{еп}$): вибрано вимірювальні перетворювачі напруги серії LEM LV 25-P (рис. 4.3).




Рисунок 4.3 – Вимірювальні перетворювачі напруги серії LEM LV 25-P

Вони працюють на основі ефекту Холла, забезпечують гальванічну розв'язку між силовим колом генератора і вхідними ланцюгами ПЛК, а також мають високий клас точності (0,5%) та миттєвий час відгуку (40 мкс), що критично для забезпечення швидкодії PID-регулятора.

3. Датчик струму ($I_г$): вибрано перетворювач струму LEM LMS 100.

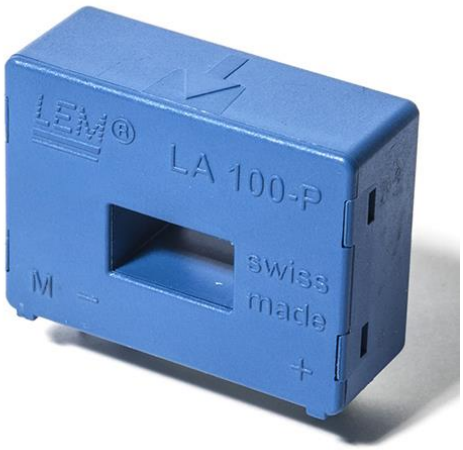



Рисунок 4.4 – Перетворювач струму LEM LMS 100

Забезпечує лінійне перетворення вихідного струму генератора в уніфікований сигнал напруги 0 – 10 В, який подається на аналоговий вхід контролера.

4. Датчик частоти обертання ротора (ω): вибрано інкрементальний оптичний енкодер Autonics E50S8 (рис. 4.5). Він встановлюється на валу генератора і передає високочастотну імпульсну послідовність на модуль високошвидкісних лічильників (HSC) ПЛК, забезпечуючи прецизійне визначення кутової швидкості ВЕУ без затримок.



Рисунок 4.5 – Інкрементальний оптичний енкодер Autonics E50S8

Технічні характеристики:

Инкрементальный энкодер с диаметром корпуса 50 мм, вал 8 мм, 600 имп./об., выход

Totem Pole, 24VDC.

Тип энкодера: инкрементальный.

Тип выхода: комплементарный.

Оптическое разрешение: 600 имп/об.

Тип вала, диаметр: выступающий, 8 мм.

Напряжение питания: 12…24В DC.

Рабочая температура: -10…+70°С.

Способ монтажа: зажимной фланец.

Подключение: кабель, L=2 м.

Класс защиты: IP50.

5. Модулі вводу-виводу сигналів.

Для підключення периферійного обладнання до CPU 1214C обираються додаткові сигнальні модулі.

Аналоговий ввід (AI): модуль SM 1231 AI (4xAI, 13 біт). Використовується для зчитування сигналів 0 -10 В від датчиків напруги LEM та датчика струму. Висока розрядність (13 біт) забезпечує необхідну точність фільтрації завад у контурі зворотного зв'язку.

Аналоговий вивід (AO): модуль SM 1232 AO (2xAO, 14 біт). Необхідний для формування керуючого сигналу напруги $U_{ker}$ ( 0 – 10 В ), який передається на виконавчий елемент силової електроніки.

6. Виконавчий пристрій (силовий перетворювач).

Виконавчим органом у контурі оптимізації електромагнітного моменту виступає статичний напівпровідниковий перетворювач, який за командами ПЛК динамічно змінює електричне навантаження на виході генератора, реалізуючи концепцію веденого гальмування.

Керований ШІМ-перетворювач/контролер заряду на базі силових SiC-

MOSFET транзисторів із драйвером керування, що приймає уніфікований сигнал 0 –10 В . ШІМ-регулятор 15A 400W MOS FET тригерний перемикач наведено на рис. 4.6.




Рисунок 4.6 – ШІМ-регулятор 15A 400W MOS FET тригерний перемикач

Використання карбід-кремнієвих (SiC) транзисторів дозволяє підняти частоту ШІМ-модуляції (до 50 – 100 кГц ), мінімізувати теплові втрати в силовому контурі та гарантувати миттєву зміну гальмівного моменту $M_{em}$ на валу генератора при пульсаціях вітрового потоку. Це повністю усуває проблему коливальності та перерегулювання системи, що підтверджено монотонним характером отриманого при моделюванні PID-тренду.

Технічні характеристики:

– два паралельно з’єднані MOSFET із низьким опором – витримують струм до 15A (до 30A з охолодженням);

– широкий діапазон робочої напруги: 5–36 В постійного струму;

– підтримка керуючих сигналів 3.3–20 В — сумісність з Arduino, STM, ESP, PLC тощо;

– підтримка частоти PWM до 20 кГц для точного керування навантаженням;

– безконтактне перемикання – великий ресурс роботи;

– робоча температура: від -40°C до +85°C;

– компактні габарити: 34 × 17 × 14 мм.

Сформований комплекс технічних засобів для автоматизації контуру регулювання навантаження ВЕУ наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Комплекс технічних засобів для автоматизації контуру регулювання навантаження ВЕУ

| Позначення на схемі | Найменування елемента | Технічні характеристики | Кількість | Примітка |
|---|---|---|---|---|
| ПЛК | Програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C | 14 DI / 10 DO, 2 AI, вбудований PROFINET, цикл від 1 мс | 1 шт. | Нижній ранг САУ |
| SM_AI | Модуль аналогового вводу SM 1231 | 4 входи: 0…10 В/4…20 мА, 13 біт | 1 шт. | Опитування датчиків LEM |
| SM_AO | Модуль аналогового виводу SM 1232 | 2 виходи: 0…10 В, 14 біт | 1 шт. | Видача сигналу $U_{ker}$ |
| ДН1, ДН2 | Датчики напруги LEM LV 25-P | Номінальний струм/напруга, точність 0,5%, гальванічна розв'язка | 2 шт. | Контури зворотного зв'язку за напругою |
| ДС | Датчик струму LEM LMS 100 | Вихід 0…10 В, безконтактне вимірювання | 1 шт. | Контроль струму навантаження |
| ДШ | Інкрементальний енкодер Autonics E50S8 | Оптичний, до 5000 імп./об, живлення 5...24 В | 1 шт. | Вимірювання швидкості ω |
| СП | ШІМ-перетворювач на SiC-MOSFET | Вхід керування 0…10 В, частота комутації до 100 кГц | 1 шт. | Регулятор моменту $M_{em}$ |

4.3 Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема автоматизації контуру регулювання навантаження ВЕУ наведена на рис. 4.7.

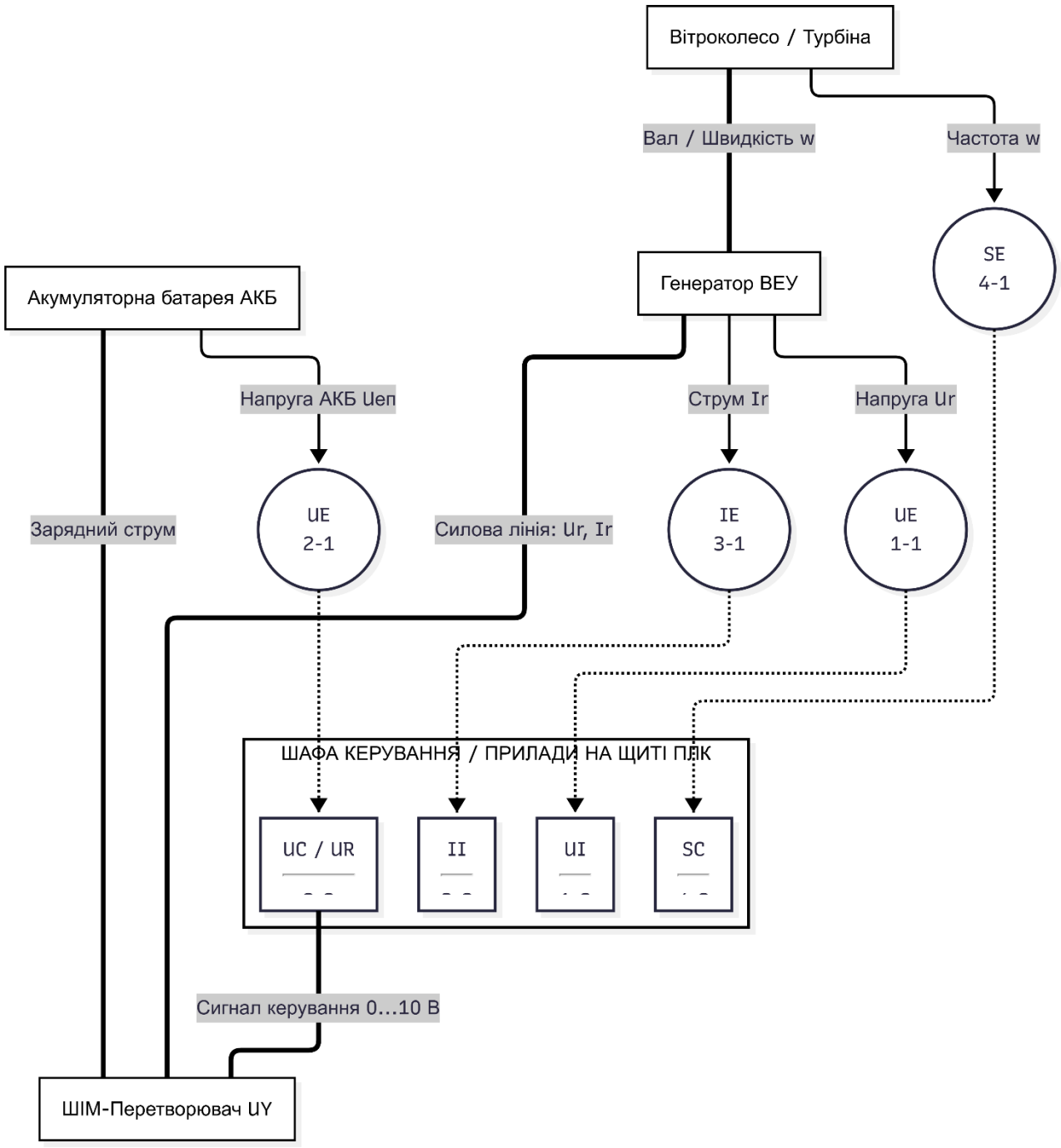



Рисунок 4.7 – Функціональні схеми автоматизації

## 4.4 Принципова схема з’єднання і підключення до ПЛК

Для підключення периферії до обраного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C) з модулями розширення встановлено таку фіксовану схему підключення (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Схема підключення зовнішніх сигналів до ПЛК

| Позначення заліза | Тип сигналу | Фізичний клемник / адреса ПЛК | Призначення лінії зв'язку |
|---|---|---|---|
| ДН1 (LEM LV 25-P) | Аналоговий (0…10 В) | Модуль SM 1231 AI: Канал 0 (AI 0) | Зворотний зв'язок: напруга генератора $U_г$ |
| ДН2 (LEM LV 25-P) | Аналоговий (0…10 В) | Модуль SM 1231 AI: Канал 1 (AI 1) | Головний зворотний зв'язок: напруга АКБ $U_{еп}$ |
| ДС (LEM LMS 100) | Аналоговий (0…10 В) | Модуль SM 1231 AI: Канал 2 (AI 2) | Контроль струму навантаження $I_г$ |
| ДШ (Autonics E50S8) | Імпульсний (Фаза А) | Вбудовані DI: Клема I0.0 (HSC 1) | Частота обертання валу ω (Канал А) |
| ДШ (Autonics E50S8) | Імпульсний (Фаза В) | Вбудовані DI: Клема I0.1 (HSC 1) | Частота обертання валу ω (Канал В) |
| СП (SiC-MOSFET) | Аналоговий (0…10 В) | Модуль SM 1232 AO: Канал 0 (AQ 0) | Вихідний керуючий сигнал на ШІМ ($U_{ker}$) |

На рисунку 4.8 наведена принципова схема з’єднання і підключення до ПЛК.

Оскільки поблизу генератора ВЕУ та силовового ШІМ-перетворювача виникають потужні електромагнітні завади високої частоти від комутації SiC-MOSFET транзисторів, усі аналогові лінії від датчиків LEM (AI 0, AI 1, AI 2), а також лінії від енкодера (DI I0.0, DI I0.1) мають виконуватися екранованою

крученою парою (STP). Екрани кабелів заземлюються строго в одній точці — на спільну шину заземлення (PE) всередині шафи ПЛК.

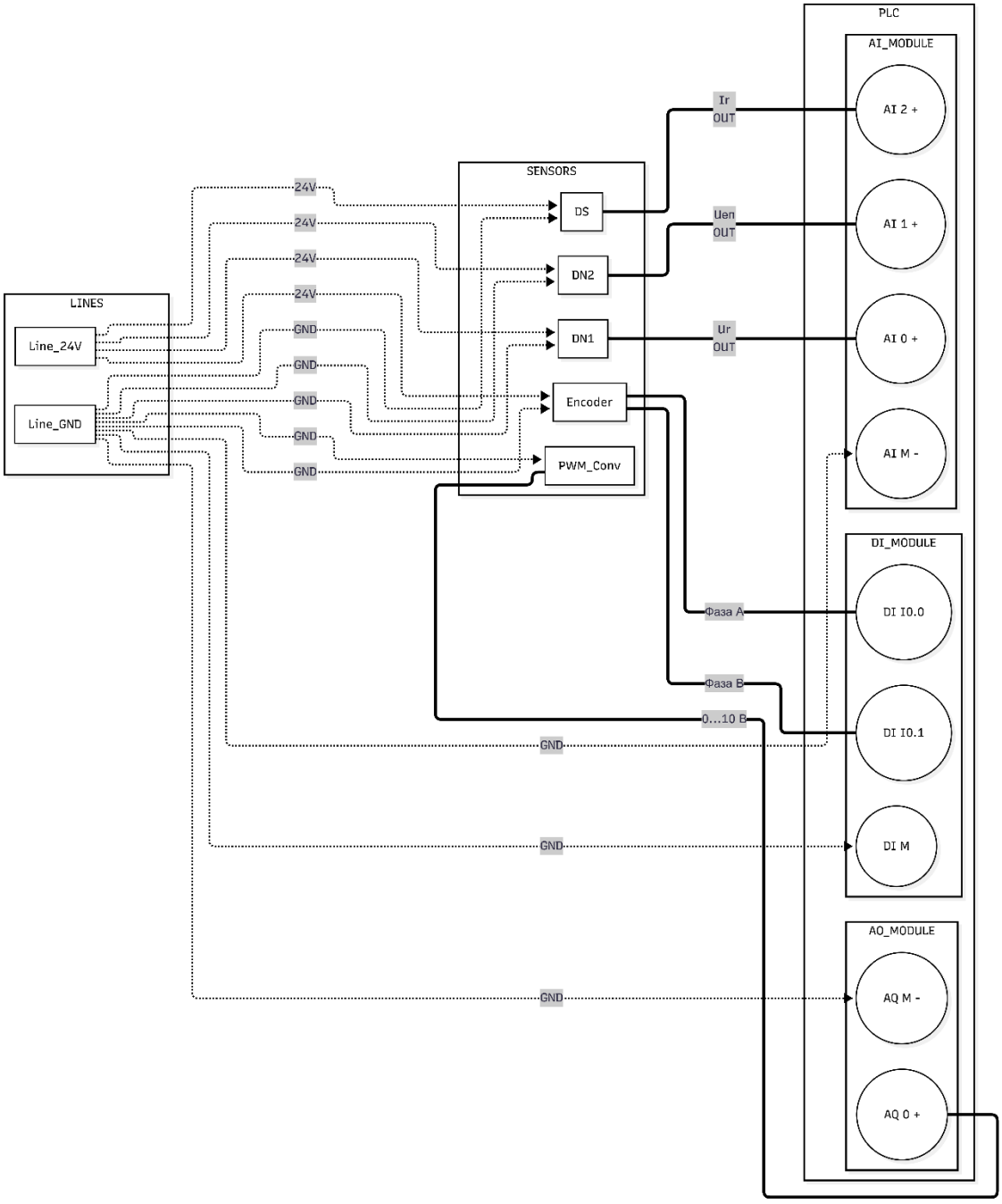



Рисунок 4.8 – Принципова схема з’єднання і підключення до ПЛК

Датчики серії LEM за своєю конструкцією забезпечують повну магнітодіольну/гальванічну ізоляцію між силовими шинами генератора (де напруга може стрибати) та слабкострумовими входами модулів ПЛК. Це захищає вхідні плати Siemens від вигорання.

Для коректного зчитування аналогових сигналів напруги 0 - 10 В, мінусові клеми датчиків, виводів живлення та опорні клеми модулів ПЛК (AI M, AQ M, DI M) обов’язково об'єднуються на загальній мідній шині «М» (GND) шафи керування.

*Висновки.* У розділі виконано повний комплекс проектно-конструкторських робіт із розробки та технічного забезпечення системи автоматичного керування контуром електромагнітного моменту генератора вітроенергетичної установки. На основі проведених досліджень обґрунтовано вибір контуру навантаження як базового для оптимізації відбору аеродинамічної потужності та стабілізації вихідних параметрів системи автономного електропостачання. Для реалізації нижнього рангу дворангової АСУ ТП вибрано високошвидкісний промисловий контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C), обчислювальна потужність якого дозволяє виконувати складні алгоритми фільтрації та регулювання в реальному часі. Технологічний моніторинг забезпечено прецизійною системою безінерційних датчиків напруги й струму LEM на основі ефекту Холла з повною гальванічною розв'язкою, а також оптичним енкодером Autonics для вимірювання швидкості ротора через апаратні модулі високошвидкісних лічильників ПЛК. Як виконавчий орган застосовано керований ШІМ-перетворювач на базі карбід-кремнієвих транзисторів (SiC-MOSFET), що дозволяє мінімізувати теплові втрати та гарантує миттєве демпфування пульсацій вітрового потоку без виникнення коливальних процесів. Відповідно до вимог стандарту ДСТУ Б А.2.4-3:2009 розроблено функціональну схему автоматизації з чітким просторовим розділенням обладнання за місцем та програмно-апаратних засобів на щиті керування. Спроектовано електричну принципову схему з'єднань із визначенням адресації каналів ПЛК та впроваджено комплекс інженерних рішень для підвищення завадостійкості САУ шляхом екранування ліній зв'язку крученою парою із заземленням в одній точці та об'єднанням нульових потенціалів на спільній шині. Розроблене технічне рішення повністю готове до практичної реалізації, пусконалагодження та інтеграції у верхній диспетчерський ранг SCADA за стандартом IEC 61400-25.

# 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 5.1 Охорона праці

Правовий фундамент регулювання безпеки праці в державі формує низка нормативно-правових актів:

– Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 №2694-XII (із відповідними змінами), який визначає засади реалізації конституційного права громадян на безпечні умови життєдіяльності та праці [2];

– Кодекс законів про працю України (КЗпП), який закріплює правові межі тривалості робочого часу, періодів відпочинку, укладання трудових договорів, а також визначає особливості організації праці жінок, молоді та функціонування контролюючих органів;

– Кодекс цивільного захисту України, що регулює питання пожежної та техногенної безпеки на підприємствах та об'єктах енергетики;

– Закон України «Про систему громадського здоров'я» (який прийшов на зміну Закону «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення»), що визначає критерії безпечного виробничого середовища та гігієни праці;

– «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)», які встановлюють диференційовані підходи до протирадіаційного захисту за умов штатної експлуатації джерел іонізуючого випромінювання та у випадках аварійного реагування [3].

Базові дефініції та принципи охорони праці в Україні регламентуються ст. 1 Закону України «Про охорону праці». Відповідно до чинного законодавства, охорона праці є комплексною системою правових, організаційно-технічних, соціально-економічних, санітарно-гігієнічних, а також лікувально-профілактичних заходів і засобів, які спрямовані на безумовне збереження

життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі виробничої діяльності [2].

Правовий фундамент регулювання безпеки праці в державі формує низка нормативно-правових актів:

Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 №2694-XII (із відповідними змінами), який визначає засади реалізації конституційного права громадян на безпечні умови життєдіяльності та праці [2].

Кодекс законів про працю України (КЗпП), який закріплює правові межі тривалості робочого часу, періодів відпочинку, укладання трудових договорів, а також визначає особливості організації праці жінок, молоді та функціонування контролюючих органів.

Кодекс цивільного захисту України, що регулює питання пожежної та техногенної безпеки на підприємствах та об'єктах енергетики.

Закон України «Про систему громадського здоров'я» (який прийшов на зміну Закону «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення»), що визначає критерії безпечного виробничого середовища та гігієни праці.

«Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)», які встановлюють диференційовані підходи до протирадіаційного захисту за умов штатної експлуатації джерел іонізуючого випромінювання та у випадках аварійного реагування [3].

Специфіка охорони праці в галузі вітроенергетики.

1. Проектування, монтаж, автоматизація та обслуговування вітроенергетичних установок (ВЕУ) супроводжуються специфічними ризиками (робота на висоті, обслуговування електроустановок під напругою, обертові механізми). Тому, крім загального законодавства, діяльність персоналу у сфері вітрогенерації жорстко регламентується спеціалізованими нормативними документами:

2. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС) та Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) –

визначають вимоги безпеки під час обслуговування генераторів, силових перетворювачів та інверторного обладнання ВЕС.

3. НПАОП 0.00-1.15-07 «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті» [4] є ключовим документом для персоналу, що здійснює сервіс, діагностику систем автоматизації та ремонт елементів гондоли, мачти і лопатей вітрогенератора.

4. ДСТУ EN IEC 61400-1:2022 (серія стандартів «Вітроенергетичні системи») – зокрема, ДСТУ EN 61400-1 встановлює загальні вимоги до проектування та безпеки конструкції турбін, а ДСТУ EN 61400-25 регламентує питання інформаційної взаємодії та безпеки систем автоматизованого моніторингу й керування ВЕС [5].

Впровадження автоматизованої системи регулювання навантаженням вітряних турбін безпосередньо спрямоване на підвищення рівня охорони праці, оскільки мінімізує необхідність перебування людини в небезпечній зоні (на висоті всередині гондоли) завдяки дистанційному моніторингу та автоматичному запобіганню аварійним режимам роботи ВЕУ.

## 5.2 Вимоги до обладнання

Вимоги до обладнання сучасних вітроенергетичних установок формуються на стику кількох інженерних дисциплін і жорстко регламентуються міжнародними та національними стандартами, зокрема базовою серією ДСТУ EN 61400. З огляду на специфіку експлуатації, конструктивні елементи ВЕУ повинні мати гарантований життєвий цикл не менше двадцяти п'яти років в умовах екстремальних кліматичних факторів. Обладнання гондоли, щогли та лопатей розраховується на стійкість до широкого температурного діапазону, циклічних вітрових навантажень, ультрафіолетового випромінювання, а також шквальних поривів вітру, швидкість яких може досягати п'ятдесяти чи сімдесяти метрів за секунду залежно від класу турбіни.

Суворі критерії висуваються до електричної підсистеми вітрогенератора, яка повинна безперешкодно інтегруватися в загальну енергомережу відповідно до жорстких вимог національних мережевих кодексів. Силові перетворювачі частоти та інверторне обладнання зобов'язані забезпечувати високу якість генерованої напруги з мінімальним коефіцієнтом гармонійних спотворень. Важливою умовою є наявність функції утримання турбіни в мережі під час короткочасних аварійних падінь напруги, а також здатність обладнання динамічно регулювати як активну, так і реактивну потужність для підтримки стабільності всієї енергосистеми.

Система автоматизованого керування, яка є ключовим об'єктом проектування, повинна функціонувати в режимі реального часу і мати високу швидкодію при обробці сигналів від первинних датчиків. Вона має забезпечувати прецизійне та узгоджене керування кутом атаки лопатей, орієнтацією гондоли за вітром та електромагнітним моментом генератора. Однією з найважливіших вимог до автоматики є її автономність та здатність до безпечного переведення турбіни в аварійний режим флюгування лопатей навіть за умов повного знеструмлення власних потреб ВЕУ або втрати зв'язку з центральним диспетчерським пунктом. При цьому обмін технологічною інформацією з верхнім рівнем SCADA повинен базуватися на стандартизованому міжнародному протоколі IEC 61400-25.

Додатково до обладнання закладаються високі вимоги щодо промислової безпеки, екологічності та експлуатаційного моніторингу. Вітротурбіни обов'язково оснащуються багаторівневими системами блискавкозахисту, інтегрованими в лопаті та щоглу, а також підсистемами вібродіагностики стану підшипників і редуктора. З екологічної точки зору конструкція лопатей має мінімізувати аеродинамічний шум до встановлених санітарних норм для населених пунктів, а програмне забезпечення системи керування повинно автоматично вираховувати та усувати ефект миготіння динамічних тіней від обертання ротора.

## 5.3 Заходи з електробезпеки

З метою нівелювання ризиків ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом, проектування та експлуатація електроустановок здійснюються у суворій відповідності до нормативних вимог: ДСанПіН 3.3.2.007-98, «Правил улаштування електроустановок» (ПУЕ), ДСТУ Б В.2.5-82:2016, НПАОП 40.1-1.32-01 та НАПБ А.01.001-2014. Безпосереднє використання обладнання регламентується нормами НПАОП 40.1-1.01-97 (ПБЕЕ), НПАОП 40.1-1.21-98 (ПБЕЕС) та НПАОП 0.00-7.15-18.

За ступенем небезпеки електротравматизму (згідно з класифікацією ПУЕ) робоче місце оператора належить до 1-го класу, тобто визначається як приміщення без підвищеної небезпеки через відсутність критичних деструктивних чинників виробничого середовища.

Захист від прямого та непрямого дотику реалізовано шляхом впровадження таких інженерних рішень (відповідно до Глави 1.7 ПУЕ):

1. Основна ізоляція струмовідних частин обладнання для захисту від прямого контакту.

2. Подвійна ізоляція (комбінація основної та додаткової), що мінімізує ризики у разі деградації первинного ізоляційного шару.

3. Захисне заземлення: керуючись п. 6.7.4 НПАОП 40.1-1.21-98, усі доступні для дотику металеві елементи корпусу та допоміжних конструкцій, які можуть опинитися під напругою внаслідок пробою ізоляції, інтегровані в загальний заземлювальний контур.

4. Зважаючи на належність робочого простору до 1-го класу небезпеки, персонал пройшов відповідне навчання за програмою інструктажу з електробезпеки (згідно з п. 6.7.6 ПБЕЕС та Додатком 1 до ПБЕЕ). Результати перевірки знань зафіксовані у відповідному журналі, а операторам присвоєно I групу з електробезпеки.

## 5.4 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки на об'єктах вітрогенерації та в приміщеннях диспетчерського управління АСУ ТП є критично важливим аспектом охорони праці, регламентованим Кодексом цивільного захисту України та Правилами пожежної безпеки в Україні. Специфіка вітроенергетичних установок, які поєднують у собі високу концентрацію силового електрообладнання, наявність горючих масел у редукторах та значну висоту конструкцій, вимагає впровадження комплексних інженерно-технічних рішень. Основними причинами виникнення пожеж на ВЕУ є короткі замикання в генераторі або силових кабелях, перегрів механічних вузлів трансмісії через тертя, а також прямі удари блискавки.

Для захисту самого вітрогенератора в гондолі встановлюються автономні системи автоматичного пожежогасіння, які здатні виявляти задимлення або критичне підвищення температури на ранніх стадіях і ліквідовувати займання без участі людини за допомогою газових чи порошкових вогнегасних речовин, що не пошкоджують електроніку. Усі матеріали, які використовуються для ізоляції кабелів та внутрішнього оздоблення гондоли, повинні мати високий клас вогнестійкості та не виділяти токсичного диму при нагріванні. Особлива увага приділяється працездатності блискавкозахисту, який відводить надпотужні струми в контур заземлення, запобігаючи термічному руйнуванню конструкцій.

У приміщенні оператора АСУ ТП пожежна безпека забезпечується належним утриманням евакуаційних шляхів, правильним розрахунком електричних навантажень на кабельні мережі ПК та регулярним технічним оглядом комутаційного обладнання. Робочий простір диспетчерської обов'язково оснащується первинними засобами пожежогасіння, зокрема вуглекислотними вогнегасниками, які є безпечними для ліквідації займань електроустановок під напругою. Персонал станції в обов'язковому порядку проходить регулярні інструктажі, протипожежні тренування та навчання діям у

надзвичайних ситуаціях, включаючи правила екстреної евакуації та безпечної зупинки технологічного процесу вітропарку.

## 5.5 Екологічна безпека функціонування вітроенергетичних установок

Розвиток вітроенергетичної галузі є одним із наріжних каменів сучасної стратегії декарбонізації та переходу до екологічно чистої енергетики, оскільки експлуатація вітрових електростанцій не супроводжується викидами парникових газів, оксидів сірки чи азоту, а також не потребує використання значних водних ресурсів для охолодження технологічних контурів. Проте, попри очевидні переваги перед традиційною тепловою генерацією, об'єкти вітроенергетики чинять певний техногенний вплив на навколишнє природне середовище. Оцінка та мінімізація цього впливу є обов'язковою умовою забезпечення екологічної безпеки на всіх етапах життєвого циклу вітроенергетичних установок, починаючи від проектування і закінчуючи утилізацією обладнання.

Одним із головних чинників фізичного впливу ВЕУ на довкілля є генерування акустичних коливань, які поділяються на механічний шум від роботи редуктора і генератора та аеродинамічний шум, що виникає внаслідок взаємодії лопатей із повітряним потоком. Особливу увагу приділяють низькочастотному шуму та інфразвуку, які за високих рівнів інтенсивності можуть чинити негативний психофізіологічний вплив на населення прилеглих територій та місцеву фауну. Для вирішення цієї проблеми на етапі проектування здійснюється суворе математичне моделювання акустичних полів та встановлюється санітарно-захисна зона навколо ВЕС, а сучасні системи автоматизованого керування здатні тимчасово знижувати оберти ротора в нічний час для забезпечення відповідності нормативним показникам.

Суттєвим аспектом екологічної безпеки є орнітологічні ризики, пов'язані з імовірністю зіткнення птахів та кажанів з обертовими лопатями турбін, а також із відлякуванням диких тварин через зміну ландшафту та вібрації щогли.

Мінімізація цих загроз досягається шляхом ретельного екологічного моніторингу під час вибору майданчиків для будівництва, що дозволяє виключити розміщення ВЕС на шляхах міграції рідкісних видів. Крім того, інноваційні системи автоматизації інтегрують камери високої роздільної здатності та радіолокаційні станції з алгоритмами штучного інтелекту, які здатні виявляти наближення зграй птахів і автоматично ініціювати превентивну зупинку турбіни.

Додатковими локальними екологічними факторами є візуальне забруднення ландшафту та ефект миготіння тіней, який виникає при перетинанні лопатями сонячних променів і може викликати зоровий дискомфорт у людей усередині житлових будівель. Ця проблема успішно нівелюється за допомогою програмних модулів АСУ ТП, які розраховують траєкторію сонця і зупиняють генерацію в чітко визначені географічні періоди, якщо тінь падає на житлову забудову. Також екологічна безпека ВЕС охоплює заходи із запобігання витоку технічних масел із гідравлічних систем та редукторів гондоли шляхом використання герметичних уловлювачів, а довгострокова стратегія розвитку галузі передбачає впровадження нових технологій переробки композитних лопатей після виведення турбін з експлуатації.

*Висновки.* У ході виконання розділу було проведено всебічний аналіз питань охорони праці, промислової, пожежної та екологічної безпеки під час проектування, експлуатації та автоматизації вітроенергетичних установок і робочого місця оператора АСУ ТП. Систематизація нормативно-правової бази підтвердила, що створення безпечного виробничого середовища базується на суворому дотриманні вимог чинного законодавства України, зокрема Кодексу цивільного захисту, профільних інструкцій НПАОП та міжнародних інженерних стандартів серії ДСТУ EN 61400. Обґрунтовано, що розробка та впровадження системи автоматизованого регулювання навантаженням вітряних турбін має безпосередній позитивний вплив на загальний рівень охорони праці, оскільки мінімізує потребу перебування обслуговуючого персоналу у високоризикових

зонах на висоті всередині гондоли за рахунок дистанційного моніторингу параметрів.

Аналіз технічних вимог до обладнання виявив необхідність забезпечення довготривалого життєвого циклу конструкцій ВЕУ в умовах циклічних вітрових і температурних навантажень, а також жорсткої інтеграції силової електроніки в загальну енергомережу згідно з національними мережевими кодексами. Особливу увагу приділено заходам з електробезпеки в диспетчерському приміщенні, яке за ступенем небезпеки електротравматизму класифіковано як приміщення першого класу без підвищеної небезпеки. Для гарантування безпеки операторів передбачено використання подвійної ізоляції, захисного заземлення всіх металевих частин комп'ютерного обладнання та дотримання регламентованих санітарно-гігієнічних перерв для запобігання психофізіологічному і зоровому перевтомленню.

У сфері пожежної та техногенної безпеки визначено ключові фактори ризику для гондоли, лопатей та операторського пункту, на основі чого запропоновано впровадження автономних газових і порошкових систем пожежогасіння, ефективного блискавкозахисту та первинних засобів ліквідації займань під напругою. З екологічної точки зору доведено, що попри нульовий рівень шкідливих викидів в атмосферу, функціонування ВЕС потребує постійної оптимізації для зниження акустичного тиску, ефекту миготіння тіней та орнітологічних ризиків. Інтеграція сучасних алгоритмів автоматизації та штучного інтелекту в систему керування дозволяє оперативно адаптувати режими роботи турбіни, забезпечуючи тим самим збалансоване поєднання високої енергетичної ефективності з безкомпромісним захистом навколишнього природного середовища та здоров'я людини.

# 6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності впровадження розробленої системи автоматичного керування (САУ) контуром навантаження ВЕУ для автономного об'єкта. Модернізація передбачає заміну застарілих або релейних схем регулювання на мікропроцесорний ПЛК Siemens S7-1200, датчики LEM та високоефективний SiC-MOSFET ШІМ-перетворювач.

Основні техніко-економічні переваги проекту:

1. Збільшення коефіцієнта використання вітрової енергії за рахунок точного відстеження точки максимальної потужності.

2. Зниження аварійності та витрат на ремонт завдяки впровадженню fail-safe захисту.

3. Подовження терміну служби акумуляторних батарей за рахунок прецизійного контролю зарядного струму.

Капітальні вкладення (К) складаються з вартості обладнання, допоміжних матеріалів, а також витрат на монтаж і пусконалагоджувальні роботи:

$$K = K_{обл} + K_{мат} + K_{монт}, \qquad (6.1)$$

Вартості елементів комплексу технічних засобів зведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Кошторис витрат на придбання обладнання та матеріалів

| Найменування елемента КТЗ | Кіл., шт. | Ціна за одиницю, грн. | Загальна вартість, грн. |
|---|---|---|---|
| ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C | 1 | 18500 | 18500 |
| Модуль аналогового вводу SM 1231 AI | 1 | 9200 | 9200 |

Продовження табл. 6.1.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Модуль аналогового виводу SM 1232 AO | 1 | 8400 | 8400 |
| Датчик напруги LEM LV 25-P | 2 | 2100 | 4200 |
| Датчик струму LEM LMS 100 | 1 | 3400 | 3400 |
| Енкодер Autonics E50S8 | 1 | 4800 | 4800 |
| ШІМ-перетворювач (SiC-MOSFET) | 1 | 5600 | 5600 |
| Допоміжні матеріали (кабелі STP, клемники, шафа) | 1 | 6000 | 6000 |
| Всього обладнання та матеріали ($K_{обл}+K_{мат}$) | | | 60100 |

Витрати на монтаж та пусконалагодження ($K_{монт}$) приймаються в розмірі 20% від вартості КТЗ:

$$K_{монт} = 60100 \cdot 0{,}20 = 12020 \text{ грн.}$$

Сумарні капітальні вкладення в проект:

$$K = 60100 + 12020 = 72120 \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат.

Експлуатаційні витрати до і після впровадження проекту включають амортизаційні відрахування, витрати на поточний ремонт та обслуговування. Для автоматизованих систем мікропроцесорного типу річні витрати на обслуговування значно менші через відсутність рухомих контактів і високу надійність.

Норма амортизації для засобів обчислювальної техніки та автоматики становить $N_a = 15\%$ .

$$\text{А} = K \cdot \frac{N_a}{100\%} = 72120 \cdot 0{,}15 = 10818 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}. \qquad (6.2)$$

Витрати на поточне обслуговування та ТР (Р).

Приймаються в розмірі 5% від капітальних вкладень:

$$\text{Р} = 72120 \cdot 0{,}05 = 3606 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}. \qquad (6.3)$$

Разом річні експлуатаційні витрати на систему САР ( $\text{С}_{\text{САР}}$ ):

$$\text{С}_{\text{САР}} = 10818 + 3606 = 14424 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}. \qquad (6.4)$$

Розрахунок економічного ефекту.

Економічний ефект досягається за рахунок двох факторів:

1. Збільшення виробітку електроенергії: Завдяки впровадженню точного PID-регулювання моменту та алгоритму пошуку точки максимальної потужності, загальний ККД (виробіток) ВЕУ зростає в середньому на 12%. При базовому виробітку установки 15000 кВт·год/рік, додатково згенерована енергія становить:

$$\Delta W = 15000 \cdot 0{,}12 = 1800 \ \frac{\text{кВт} \cdot \text{год.}}{\text{рік}} \qquad (6.5)$$

При розрахунковому автономному тарифі (або вартості заміщеної енергії з мережі/дизеля) у 8,00 грн за кВт·год, економія становить:

1. Запобігання передчасному зносу АКБ: прецизійне ШІМ-регулювання струму заряду виключає сульфатацію та перезаряд батарей, що подовжує їхній термін служби з 3 до 5 років. Це економить власнику близько 12000 грн/рік на капітальних замінах елементів живлення ( $Э_2$ = 12000 грн./рік).

Загальний річний економічний ефект (прибуток):

$$П = \ Е_1 + Е_2 - С_{САР} = 14400 + 12000 - 14424 = 11976 \ \frac{грн.}{рік}. \qquad (6.6)$$

Розрахунок показників ефективності інвестицій.

Термін окупності проекту ($Т_{ок}$) показує час, за який капітальні вкладення повністю повернуться за рахунок генерованого чистого прибутку:

$$Т_{ок} = \frac{К}{П} = \ \frac{72120}{11976} = 6{,}02 \text{ років}. \qquad (6.7)$$

Коефіцієнт економічної ефективності ( Е ):

$$Е = \ \frac{1}{Т_{ок}} = \ \frac{1}{6{,}02} = 0{,}166 \qquad (6.8)$$

Отримане значення Е = 0,166 перевищує нормативний коефіцієнт ефективності для галузі відновлюваної енергетики та автоматизації ( $Е_н$ = 0,12 - 0,15), що свідчить про доцільність капіталовкладень.

*Висновок*. Проведені техніко-економічні розрахунки підтвердили високу фінансову та експлуатаційну доцільність модернізації ВЕУ. При загальних капітальних витратах у розмірі 72120 грн на придбання та монтаж обладнання нижнього рівня АСУ ТП (ПЛК Siemens, датчики LEM, SiC-MOSFET перетворювач), чистий річний економічний ефект становить 11976 грн.

Проект має термін окупності 6 років, що є повністю прийнятним показником для систем альтернативної енергетики малого та середнього класу, а коефіцієнт ефективності інвестицій (0,166) підтверджує раціональне використання ресурсів.

# ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальну науково-практичну задачу, а саме розроблено, досліджено та технічно обґрунтовано комплексну систему автоматизованого регулювання навантаження промислової вітроенергетичної установки (ВЕУ). Впровадження цієї системи безпосередньо спрямоване на підвищення енергетичної ефективності відбору потужності в умовах стохастичного вітрового потоку, зниження механічних ризиків і деструктивних динамічних навантажень на конструктивні елементи установки, а також забезпечення стабільної інтеграції об'єкта в автономну або загальну електричну мережу.

Результати проведеного теоретичного, експериментального та проектно-економічного дослідження дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. Комплексний аналіз сучасного стану вітроенергетичного сектору України показав, що попри складні макроекономічні та безпекові виклики у 2025–2026 роках, галузь демонструє стійку динаміку розвитку, масштабування потужностей та інтеграції систем накопичення енергії. Об'єкт автоматизації визначено як складний аеродинамічний та електромеханічний комплекс, що містить інноваційний синхронний генератор на основі високотемпературної надпровідності. Було чітко типізовано логіку функціонування ВЕУ за п'ятьма експлуатаційними зонами залежно від швидкості вітру, що лягло в основу алгоритмічного забезпечення системи керування.

2. Сформовано нелінійну математичну модель динамічних режимів роботи ВЕУ, яка враховує момент інерції системи, аеродинамічні характеристики лопатей, електромагнітний момент та коефіцієнт використання енергії вітру як функцію від швидкохідності. Отримані графіки розподілу аеродинамічної потужності підтвердили наявність чітко вираженого екстремуму (точки максимальної потужності) для кожної швидкості вітру. На основі лінеаризованих рівнянь елементів (двигуна, підсилювачів, генератора) синтезовано передавальні

функції розімкнутої та замкнутої систем автоматичного регулювання в середовищі MATLAB.

3. За допомогою першого методу Ціглера-Ніколса проведено параметричний синтез лінійних регуляторів. Порівняльний аналіз отриманих перехідних процесів показав, що оптимальним є PID-регулятор, який забезпечив абсолютно точний, стійкий та аперіодичний (монотонний) характер перехідного процесу з мінімальним часом регулювання (0,3 с). Це гарантує ефективне демпфування ударних навантажень на трансмісію при різких поривах вітру.

4. Для реалізації нижнього рівня дворівневої АСУ ТП обґрунтовано та обрано сучасну мікропроцесорну базу. Головним обчислювальним ядром визначено промисловий програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC). Його швидкодія (цикл виконання програми менше 1,5 мс та об'єм пам'яті повністю задовольняють вимогам реального часу. Інформаційно-вимірювальний рівень укомплектовано прецизійними безінерційними датчиками напруги та струму LEM на основі ефекту Холла, що забезпечують повну гальванічну розв'язку, а також оптичним інкрементальним енкодером Autonics E50S8 для швидкісного підключення до HSC-каналів ПЛК.

5. Як виконавчий орган контуру регулювання моменту застосовано керований ШІМ-перетворювач на базі карбід-кремнієвих транзисторів (SiC-MOSFET). Висока частота комутації (до 100 кГц) мінімізує теплові втрати та забезпечує миттєву зміну гальмівного моменту. Відповідно до чинних стандартів розроблено функціональну схему автоматизації та принципову схему електричних з'єднань. Для захисту від потужних електромагнітних завад впроваджено комплекс інженерних рішень: використання екранованої крученої пари типу STP із заземленням екранів в одній точці та об'єднання опорних потенціалів датчиків і модулів ПЛК на спільній мідній шині «М».

6. У роботі всебічно розглянуто безпекові аспекти. Доведено, що автоматизація ВЕУ суттєво підвищує рівень охорони праці, мінімізуючи потребу перебування персоналу на висоті у гондолі завдяки дистанційному моніторингу за стандартом IEC 61400-25. Робоче місце оператора за класифікацією ПУЕ

віднесено до приміщень без підвищеної небезпеки; запроектовано системи захисного заземлення, подвійної ізоляції та автоматичного пожежогасіння. З екологічної точки зору враховано орнітологічні ризики, ефект миготіння тіней та акустичний тиск, для нівелювання яких алгоритмічно передбачено превентивну зупинку та нічне обмеження обертів ротора.

7. Розрахунок економічних показників підтвердив фінансову доцільність модернізації. При сумарних капітальних інвестиціях у розмірі 72120 грн. (включаючи вартість КТЗ, матеріалів та монтажу), річні експлуатаційні витрати на обслуговування системи становлять 14424 грн. Економічний ефект досягається завдяки збільшенню річного виробітку енергії на 12 % (1800 кВт/год.) та подовженню терміну служби акумуляторних батарей з 3 до 5 років, що генерує чистий прибуток у розмірі 26400 грн./рік. Чистий річний економічний ефект становить 11976 грн. Розрахунковий термін окупності проекту становить 6 років, а коефіцієнт ефективності інвестицій (E = 0,166) перевищує галузевий норматив ($E_H$ = 0,12 – 0,15).

Розроблена система автоматизації є технічно завершеною, алгоритмічно оптимізованою та економічно виправданою. Вона повністю готова до практичного впровадження, пусконалагодження та подальшої інтеграції у верхній диспетчерський ранг SCADA вітропарків

Отже, впровадження розробленої системи автоматизації є доцільним, оскільки воно безпосередньо вирішує проблему стохастичності вітрового потоку, підвищуючи річний виробіток електроенергії установки.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII Голос України. 2017. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

3. НРБУ-97/Д-2000 Норми радіаційної безпеки України. Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення. Державні гігієнічні нормативи (ДГН 6.6.1.-6.5.061-2000).

4. НПАОП 0.00-1.15-07 Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті.

5. ДСТУ EN IEC 61400-1:2022 Системи виробництва енергії вітру. Частина 1. Вимоги до проєктування (EN IEC 61400-1:2019, IDT; IEC 61400-1:2019, IDT).

6. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Вид. офіц. Київ. 1998. 45 с. (Інформація та документація).

7. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. 45 с. (Інформація та документація).

10. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

12. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації споживачів

електроустановок. [Чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

13. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [Чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

14. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

15. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

16. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

17. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

18. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру: навч. посіб / С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак. – Львів: ≪Магнолія 2006≫, 2018. 182 с.

19. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. 335 с.

20. Вольська А.В., Чуб І.М. // МНПК «Інформаційні технології в сучасному світі», Харків, ДБТУ, 2025. 560 с.

21. Петренко І. М., Коваленко С. В. Вітроенергетика: монографія. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2023. 300 с.

22. Бойко С. М., Сінчук І. О., Жуков О. А., Савицький О. І. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: підручник. Кривий Ріг. 2021. 204 с.

23. Відновлювані джерела енергії: підручник. / А. А. Барило та ін. Запоріжжя: ЗНУ, 2024.– 400 с.

24. Гончаренко Ю. П. Дослідження впливу параметрів вітрового потоку на вибір характеристик автономної вітроелектроустановки. – Відновлювана енергетика, 2022. – №2(69). – С. 56–63.

25. Сінчук О. М., Бойко С. М., Ялова О. В. Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювальна енергетика: підручник. Київ: КНУ, 2020. 340 с.

26. Саух С. Є., Борисенко А. В. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія. Київ: Три К, 2020. 340 с.

27. Калетнік Г. М., Пришляк В. М. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. 312 с.

28. Довгий Б.П., Вакал Є.С., Вакал Ю.Є., Попов А.В. Використання математичного пакета MATLAB для розв'язування задач автоматизації: навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНУ, 2023. 120 с.

29. Гурко О. Г., Єрьоменко І. Ф. Аналіз та синтез систем автомтатичного керування в MATLAB: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2021. 286 с.

30. Кравченко І. В., Микитенко В. І., Тимчик Г. С. Комп’ютерне моделювання: системи і процеси: підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2022. 215 с.

31. Основи проектування систем енергозбереження: Методичні вказівки до проведення практичних занять для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», професійного спрямування «Прилади і системи точної механіки» та «Інформаційні технології в приладобудуванні» // Уклад.: А. В. Писарець, І. В. Коробко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. 55 с.

32. Геврик Є.О. Охорона праці: навчальний посібник. Кременчук: КрНУ, 2020. 256 с.

33. Ivanov, O.B., Shkrabets, F.P., Zawilak, Jan. (2021).Electrical generators driven by renewable energy systems, Wroclaw University of Technology, Wroclaw. 169 p.

34. Українська вітроенергетична асоціація УВЕА «Вітроенергетичний сектор України 2024». URL: https://uwea.com.ua/ua/news/entry/ (дата звернення

03.06.2025).

35. Вітроенергетика – практичні аспекти і перспективи. [Електронний ресурс] URL: https://agro-business.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/2081-vitroenerhetyka-praktychni-aspekty-i-perspektyvy.html (дата звернення 20.05.2025).

36. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. [Електронний ресурс] URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf (дата звернення 20.05.2025).

37. Вітроенергетичні установки (ВЕУ), пристрій та принцип роботи. [Електронний ресурс] URL: https://greenwindukraine.com.ua/vitroenerhetychni-ustanovky-prystriy-ta-pryntsyp-roboty/(дата звернення 23.05.2025).

38. Принцип роботи вітрогенератора. [Електронний ресурс] URL: https://vencon.ua/ua/articles/printsip-raboty-vetrogeneratora (дата звернення 24.05.2025).

39. Energy Education, Wind Power. [Електронний ресурс] URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind_power#:~:text=Between%20the%20cut%2Din%20speed,important%20factor%20for%20wind%20power (дата звернення 26.05.2025).

40. Вертикальные ветрогенераторы Украина. [Електронний ресурс] URL: http://altenergo.biz/vetrogeneratory/ (дата звернення 20.05.2025).

41. Power Factor. Коэффициент мощности. [Електронний ресурс] URL: https://ledfactor.ua/page/power-factor. (дата звернення 01.06.2025).

42. Кафедра комп’ютеризованих електромеханічних систем і комплексів. Вітрогенератор. [Електронний ресурс] URL: https://cemsc.vntu.edu.ua/?p=508. (дата звернення 03.06.2025).