

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і
технологій

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Обґрунтування побудови та дослідження системи управління
горизонтальним вітрогенератором»

ХАІ 502.560м.23О.172.1905016 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу групи № 560М

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

(код та найменування)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

(код та найменування)

Освітня програма «Радіоелектронні
комп'ютеризовані засоби»

(шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності))

Калмиков В.В

(прізвище та ініціали студентки)

Керівник: Бабаков М.Ф. к.т.н., доцент

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Невлюдов І.Ш., д.т.н., професор

(прізвище й ініціали)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій
(повне найменування)

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій
(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
(код та найменування)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код та найменування)

Освітня програма «Радіоелектронні комп'ютеризовані засоби»
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. В. Висоцька

(підпис)

(ініціали та прізвище)

«10» жовтня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Калмиков Валерій Вікторович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Обґрунтування побудови та дослідження системи управління горизонтальним вітрогенератором» керівник кваліфікаційної роботи Бабаков Михайло Федорович, к.т.н., доцент.

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

затверджені наказом Університету № 1873а -уч від «10» жовтня 2023 р.

2. Термін подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 11.01.2024.

3. Вихідні дані до роботи: технічний опис побудови горизонтальних вітрогенераторів; вітрогенератор класу В; вимоги до побудови системи управління вітрогенератора; потужність 0,53 МВт.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати)

1. Аналіз особливості конструкції вітрогенераторів та область їх використання

2. Дослідження архітектури САУ вітрогенератора

3. Дослідження системи автоматизованого управління вітрогенератора

4. Вдосконалення контролера автоматизованої системи ВЕУ

5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (додатків):

1. Конструктивна схема вітроустановки (плакат, арк. А4).
2. Загальна структурна схема вітроенергетичної установки (плакат, арк. А4).
3. Багатоканальна схема управління режимом роботи ВЕУ (плакат, арк. А4)
4. Система з ПД-регулятором (плакат, арк. А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	Бабаков М.Ф., доцент	23.10.23	23.10.23

Нормоконтроль _____ В.М. Олійник « 14 » січня 2024 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання «23» жовтня 2023 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз особливості конструкції вітрогенераторів та область їх використання	23.10.2023 р	
2	Дослідження архітектури САУ вітрогенератора	24.10.2023-02.11.2023 р	
3	Дослідження системи автоматизованого управління вітрогенератора	04.11.2023-12.11.2023 р	
4	Вдосконалення контролера автоматизованої системи ВЕУ	14.11.2023-23.11.2023 р	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	25.11.2023-10.12.2023 р	
6	Оформлення пояснювальної записки	12.12.2023-07.01.2024 р	
7	Попередній захист роботи та усунення зауважень.	09.01.2024-16.01.2024 р	
8	Захист кваліфікаційної роботи.	19.01.2024 р	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

В.В. Калмиков
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

М.Ф. Бабаков
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: с. 135, Рис. 60, табл. 2, дод. 4, джерел 20.

ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ ВІТРОГЕНЕРАТОР, КЛАСИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРОМ,

Об'єкт дослідження автоматична система управління горизонтальним вітрогенератором.

Мета дослідження обґрунтування побудови цифрового контролера для управління вітрогенератором і здійснення моніторингу його параметрів в режимі реального часу.

Методи дослідження: аналіз і порівняння відомих методів керування, методи аналізу і забезпечення стійкості САУ, об'єктна реляційна методологія розробки програмного забезпечення.

Для досягнення мети треба провести аналіз особливостей будови та використання існуючих контролерів вітродвигуна, охарактеризувати різновиди та класи вітродвигунів, дослідити властивості та застосування ПІД-регулятора, визначити типові закони управління системою автоматичного регулювання (САУ). Проаналізувати математичні моделі для різних видів керування, визначити оптимальний метод управління САУ та вивчити способи налаштування ПІД-регулятора в системі керування вітродвигуна. Оптимізувати програмний алгоритм налаштування та провести тестування вдосконаленого регулятора на мікроконтролері Arduino. Представити контролер на основі регулятора для системи автоматичного управління вітродвигуном. В результаті дослідження побудовано контролер на основі ПІД-регулятора для САУ управління вітрогенератором з моніторингом параметрів. Розібрані заходи щодо охорони праці і техніки безпеки при монтажі і експлуатації САУ. Розробка призначена для фахівців у сфері комп'ютеризованих електронних засобів.

ABSTRACT

Explanatory Note for Qualification Work: p. 135, Fig. 60, Table 2, Annex 4, Source 20.

CONTROL METHODS, HORIZONTAL WIND TURBINE, MATHEMATICAL MODEL, WIND TURBINE CLASSES, WIND TURBINE CONTROL SYSTEM,

The research object is an automatic control system for a horizontal wind turbine.

The research aim is to justify the construction of a digital controller for wind turbine control and real-time parameter monitoring.

Research methods include the analysis and comparison of known control methods, methods for analyzing and ensuring the stability of control systems, object-oriented relational methodology for software development.

To achieve the goal, it is necessary to analyze the structure and use of existing wind turbine controllers, characterize the types and classes of wind turbines, investigate the properties and applications of a PID controller, determine typical control laws for automatic control systems (ACS). Analyze mathematical models for different control methods, identify the optimal ACS control method, and study tuning methods for the PID controller in the wind turbine control system. Optimize the software algorithm for tuning and conduct testing of the improved controller on an Arduino microcontroller. Present a controller based on the PID controller for the wind turbine ACS. As a result of the research, a controller based on the PID controller for the wind turbine ACS with parameter monitoring is developed. Safety measures for the installation and operation of the ACS are discussed. The development is intended for professionals in the field of computerized electronic devices.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ ТА ОБЛАСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ.....	12
1.1 Загальні відомості.....	12
1.2 Вітрогенератори із горизонтальною віссю обертання.....	14
1.3 Вітрогенератори з вертикальною віссю обертання	19
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1	24
2. ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ САУ ВІТРОГЕНЕРАТОРА	26
2.1 Класи ВЕУ та їх структурні схеми	26
2.2 Дослідження побудови систем автоматичного регулювання, управління і захисту ВЕУ	32
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	41
3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВІТРОГЕНЕРА	42
3.1 Змістовна та графічна моделі об'єкта стабілізації.....	42
3.2 Створення математичних моделей для стабілізації вітроенергетичної установки з урахуванням нелінійних та лінеаризованих ефектів	44
3.3 Формування функціональної схеми системи	50
3.4 Формування структурної схеми та передавальних функцій об'єкту автоматичного керування щодо впливу на управління та збурюючі ефекти. .	51
3.5 Визначення коефіцієнта передачі коригувального елемента для досягнення заданої точності системи автоматичного керування	62
3.6 Синтез коригувального пристрою методом ЛАЧХ	68

3.7 Дослідження та аналіз функціональних властивостей удосконаленої системи.	74
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3	76
4. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЕРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВЕУ	77
4.1 Особливості застосування ПД-регулятора та його властивості.....	77
4.2 Типові закони керування	82
4.2.1 Пропорційне керування	82
4.2.2 Пропорційно-диференціальне керування	86
4.2.3 Інтегральне керування	90
4.2.4 Пропорційно-інтегрально-диференціальне керування.....	94
4.3 Способи налаштування ПД-регулятора в системі керування вітродвигуна	97
4.4 Програмний алгоритм налаштування ПД-регулятора	100
4.5 Тестування розробленого ПД-регулятора на платформі Arduino.....	103
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	113
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	115
5.1 Заходи з охорони праці під час експлуатації вітрових турбін.....	115
5.2 Техніка безпеки при монтажі і експлуатації системи стабілізації	119
5.3 Пожежна безпека і мікроклімат при експлуатації вітроелектростанцій ..	120
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5	122
ВИСНОВОК.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТОК А «Конструктивна схема вітроустановки».....	128
ДОДАТОК Б «Загальна структурна схема вітроенергетичної установки».....	130

ДОДАТОК В «Багатоканальна схема управління режимом роботи ВЕУ»	132
ДОДАТОК Г «Система з ПД-регулятором»	134

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

САУ – система автоматизованого управління

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ВЕУ – вітроенергетична установка

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВЕС - вітроенергетичні станція

ДЕС - дизель-генератор

ДШ- датчик швидкості

ДВ - давач вітру

Ф - фільтр

ДМ - датчик крутного моменту

К - квадратор

ЛАЧХ - лагорифмічна амплітудно-частотна характеристика

ФЧХ - фазочастотна характеристика

ТАР - теаорія автоматичного регулювання

ПК - пристрій керування

П-регулятор - пропорційний регулятор

Д-компонента - диференціальна компонента

ПІД-регулятор - пропорційно-диференціальний регулятор

ШІМ - широтно-імпульсний механізм

ВСТУП

Актуальність роботи. На сьогодні все гостріше постає питання про використання альтернативних джерел енергії для отримання енергетичних благ. Світ поступово відходить від тих видів виробництва, які спричиняють викиди в атмосферу та потребують використання твердих паливних енергоносіїв та все більше переводить виробництво на застосування таких видів енергетики як сонячна, вітряна та гідро енергетика, та інші альтернативні її види.

В даній роботі досліджено контролер для САУ вітрогенератора, що зможе забезпечити ефективність та надійність роботи самого вітрогенератора і оптимізувати його використання. Представлення контролера дасть можливість підвищити коефіцієнт корисної дії вітрогенератора та забезпечити максимально безпечний режим його експлуатації та допоможе зберегти цілісність всіх його вузлів при погіршенні погодних умов. Необхідно зважити на важливість детального аналізу математичної моделі даного виробу, так як від цього залежить на скільки контролер буде чітко працювати та оперативно виконувати очікувані від нього функції.

Крім ефективного представлення моделі контролера, необхідна організація її взаємодії з реальними об'єктами для оперативного отримання інформації про зміни різних параметрів САУ, що дозволить заздалегідь спрогнозувати можливі наслідки застосування тих або інших дій.

Тому тема роботи, яка спрямована на вдосконалення побудови вітрогенератора, є актуальною науково-технічною задачею.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в вдосконаленні сучасного та надійного контролера для САУ вітрогенератора, який зможе повністю задовольнити його функціональні вимоги та здійснювати моніторинг параметрів в режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішення наступних завдань:

- охарактеризувати типи та класи вітродвигуна;
- провести аналіз існуючих контролерів для вітродвигуна та методів керування САУ;
- дослідження ПДД-регулятора та його властивостей;
- складання математичної моделі САУ;
- дослідження ефективного керування САУ та налаштування ПДД-регулятора.

Об'єктом дослідження є автоматична система управління горизонтальним вітрогенератором.

Предметом дослідження є методи та засоби визначення оптимальних можливостей вітрогенератора.

Методи дослідження:

- аналіз і порівняння відомих методів керування;
- методи аналізу і забезпечення стійкості САУ;
- об'єктна реляційна методологія розробки програмного забезпечення.

Наукова новизна. досліджено алгоритм контролера на базі ПДД-регулятора на основі передбачення можливих змін погодних умов (різкої зміни швидкості вітру) для збільшення часу безвідмовної роботи вітродвигуна та запобігання критичної ситуації генератора при цьому визначені оптимальні режими роботи САУ вітродвигуна шляхом підбору керуючих коефіцієнтів ПДД-регулятора;

Практична цінність отриманих результатів:: застосування ефективної системи ПДД-регулятора для малопотужних вітродвигунів та досліджений контролер на базі під регулятора допоможе оптимізувати та захистити роботу вітродвигуна збільшити його ефективність в реальному часі не зважаючи на погодні умови.

1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ ТА ОБЛАСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

1.1 Загальні відомості

Вітрогенератор є пристроєм, який шляхом перетворення потоку вітру виробляє електричну або механічну енергію для подальшого використання споживачами [1]. На сьогодні відомі два основних типи вітрогенераторів, конструктивні відмінності яких полягають у розташуванні вісі обертання елемента, який захоплює енергію вітру. Вітрогенератори бувають:

- з горизонтальною віссю обертання (Рис. 1.1, а);
- з вертикальною віссю обертання (Рис. 1.1., б).

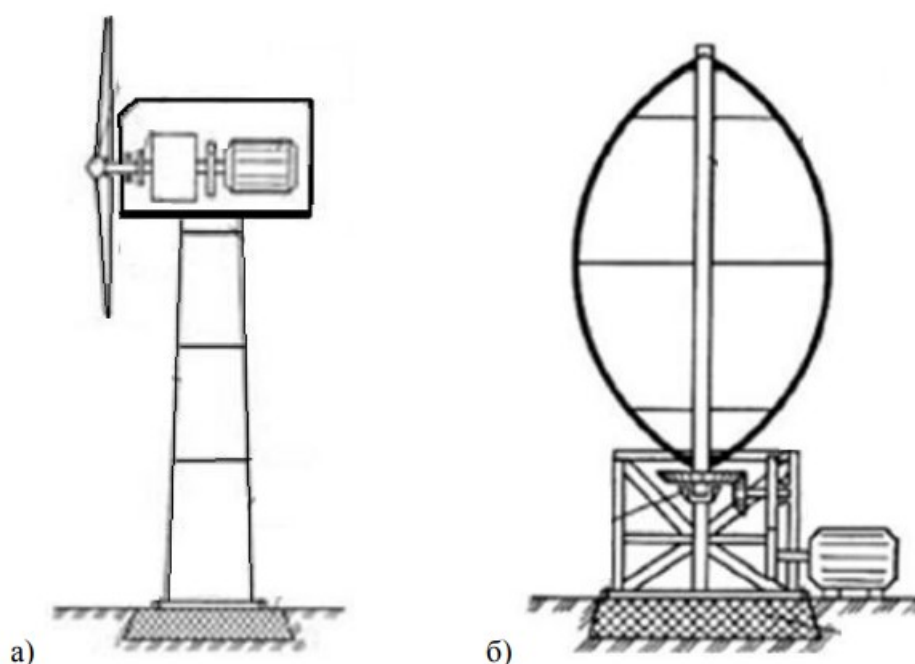


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд вітроустановки з горизонтальною віссю обертання (а) та з вертикальною віссю (б)

Принцип роботи вітрогенератора - дуже простий. Потік вітру викликає тиск на лопаті позиція 12 на (Рис. 1.2) вітрового колеса. Ротор позиція 1 на (Рис. 1.2) вітрового колеса закріплений на низькоспідничному валу позиція 2 на (Рис.

1.2). Під впливом вітру вітрове колесо (ротор з лопатями та низькоспідничний вал) починає обертатися, здійснюючи перетворення вітряної енергії в механічну. Від низькоспідничного вала через редуктор позиція 3 на (Рис. 1.2) механічний рух передається на вал позиція 8 на (Рис. 1.2) електричного генератора позиція 4 на (Рис. 1.2). При обертанні ротора електрогенератора здійснюється перетворення механічної енергії в електричну.

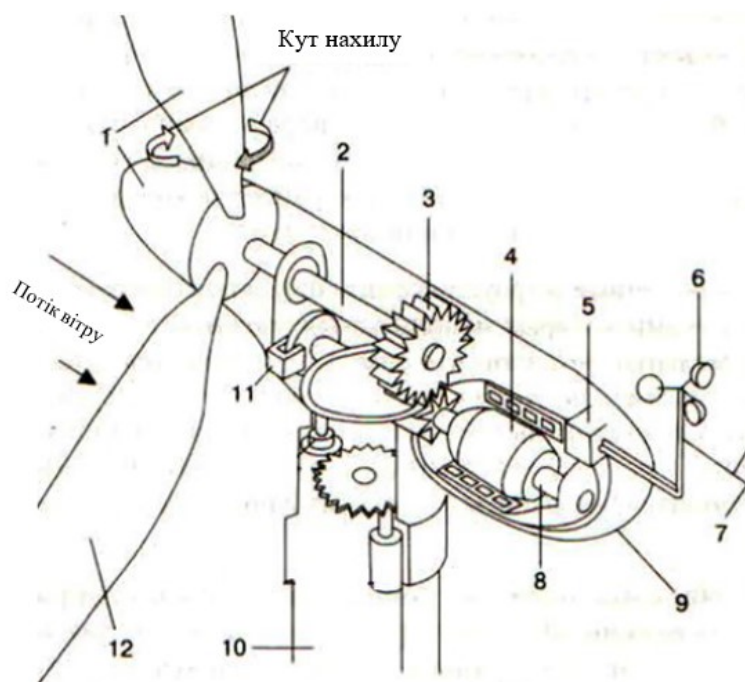


Рисунок 1.2 – Конструктивна схема вітроустановки

На (Рис. 1.2) показана конструктивна схема електроустановки, що надає повне уявлення про її пристрій. На схемі використовуються наступні позиційні позначення:

1. ротор вітроколеса, що бери участь у процес претворённяя тиски ветру в механична енергию.
2. низькоспідничний вал, який приводиться в рух ротором вітроколеса і задіяний у передачі механічної енергії.
3. редуктор, що підвищує частоту обертання вітроколеса (ротора).
4. генератор, який виробляє електроенергію і має у своєму складі високоспідничний вал.

5. контролер, відповідальний за управління всією установкою. З його допомогою в автоматичному режимі запускаються вітряні турбіни або здійснюється їх зупинка.

6. анемометр, призначений для визначення швидкості вітру з подальшим передаванням даних контролеру.

7. флюгер, визначає напрямки вітру і повертає вітроколесо у потрібному напрямку.

8. високоспідничний вал, який обертає ротор електрогенератора.

9. гондола, розташована в верхній частині вітряної турбіни і є несучою частиною конструкції. Всередині неї розташовані вали, редуктор, генератор, контролер та гальмо.

10. мачта, що представляє собою порожнисту конструкцію з металу або бетону, яка використовується для розміщення всіх основних елементів на висоті.

11. гальмо, що запобігає поломкам установки і використовується для зупинки ротора в критичних ситуаціях (наприклад, під час урагану).

12. лопаті, які є ключовим елементом вітроустановки, призначеним для захоплення енергії вітру. За допомогою лопатей здійснюється функціонування даного пристрою. Потік вітру, потрапляючи на лопаті, приводить їх у рух та забезпечує обертання ротора і подальше вироблення енергії генератором.

Незважаючи на наявні схожості, існують суттєві відмінності в характеристиках вітрогенераторів із горизонтальною і вертикальною осями обертання. Проаналізуємо технічні можливості вітрогенераторів обох конструктивних типів.

1.2 Вітрогенератори із горизонтальною віссю обертання

На даному етапі горизонтальні вітрогенератори користуються найбільшою популярністю [1 – 2]. У них вісь обертання вітрового колеса, лопаті якого обертаються проти вітру, розташована паралельно до землі. Такий варіант виконання отримав назву "вітряний млин". Конструкція горизонтальних

вітрогенераторів виконана так, що передня частина вітрового колеса, здійснюючи пошук вітру, автоматично повертається.

Крім того, кут повороту лопатей може змінюватися також, щоб спіймати навіть слабкий вітер. Вважається, що цей тип вітрогенераторів підходить для виробництва великого обсягу електроенергії.

Горизонтальні вітрові установки відзначаються високим ККД (40-50%). Тому цей вид зазвичай використовується при створенні систем вітряних електростанцій.

У вітрогенераторів із горизонтальною віссю обертання вітрове колесо може виконуватися з різною кількістю лопатей. Залежно від цього розрізняють однолопатеві, дволопатеві, трьохлопатеві та багатолопатеві модифікації.

До складу вітрогенераторів із горизонтальною віссю обертання обов'язково входять додаткові конструктивні елементи, що забезпечують орієнтацію ротора вітрового колеса за напрямком вітру, що ускладнює конструкцію і є недоліком даного типу ВЕУ.

Перевагою вітрогенераторів із горизонтальним обертанням вала є їх велика ефективність порівняно з моделями, де вісь обертання розташована вертикально. Це пояснюється тим, що кути натиску в робочих режимах тут менше.

Тому вітрогенератори із горизонтальним обертанням вала відрізняються меншими масогабаритними показниками в порівнянні з вертикальними ВЕУ, що генерують однакову потужність.

Розглядають конструктивні варіанти горизонтальних ВЕУ.

а) Однолопатеві вітрогенератори

Основна перевага однолопатевих вітрогенераторів - високі оберти обертання. Замість другої лопаті встановлений противага, яка мало впливає на опір руху повітря, що надає можливість використовувати їх для генераторів з високими обертами обертання, зокрема асинхронних.

Однолопатеві вітрогенератори можуть працювати при дуже слабких вітрах. Недоліки однолопатєвого вітряка:

- через високу швидкість обертання великий гіроскопічний ефект, що уповільнює обертання ротора при зміні вітру і створює додаткове навантаження на лопаті, втулку та вузол обертання.
- через високу швидкість обертання великий гіроскопічний ефект, що уповільнює обертання ротора при зміні вітру і створює додаткове навантаження на лопаті, втулку та вузол обертання.
- підвищена небезпека при функціонуванні установки, обумовлена тим, що сила удару швидкообертової лопаті вища, ніж повільнообертової.
- потреба у точному балансуванні лопаті. На (Рис. 1.3) подано приклад однолопатевого вітрогенератора.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд однолопатевого вітрогенератора

б) Дволопатеві вітрогенератори

Вітрогенератори дволопатевого типу схожі за будовою з однолопатевиими, відрізняються лише кількістю лопатей. У порівнянні з однолопатевою конструкцією вони мають перевагу. Оскільки тут кількість лопатей парна, то

ротор вітроколеса залишається урівноваженим при будь-якому кутовому положенні його лопатей. Тому тут немає додаткових конструктивних елементів, які б забезпечували урівноваженість конструкції. Спрощення конструкції призводить до зниження вартості даної модифікації порівняно з аналогічною моделлю однолопатевої ВЕУ.

Недоліком розглянутої конструкції є те, що вона більш шумна та схильна до вібрацій [1].

Прикладом самопідіймальної дволопатевої вітроустановки є Gev MP, номінальною потужністю 275 кВт, французької компанії Vergnet S.A (Рис. 1.4).



Рисунок 1.4– Зовнішній вигляд дволопатевого вітрогенератора

в) Трилопатеві вітрогенератори

Це – найпоширеніша модифікація вітрогенераторів з горизонтальною віссю вращения вала вітроколеса.

Дослідження, проведені данськими вченими ще в 70-х роках минулого століття, показали, що оптимальна кількість лопатей горизонтальних

вітрогенераторів дорівнює трьом. Це висновок був добре засвоєний великими виробниками вітрогенераторів [1]. Тому ці вітряки найбільш широко представлені на ринку. Вітрогенератори з трьома лопатями випускаються з потужностями від кількох ват до кількох мегаватт 6. В якості прикладу на (Рис. 1.5) представлений один із найпотужніших на сьогодні трьохлопатевих вітроенергетичних установок марки Enercon E-126 ($P_{ном} = 7\text{МВт}$).



Рисунок 1.5– Вигляд трьохлопатевого вітрогенератора

г) Багатолопатні вітрогенератори

До багатолопатних відносяться горизонтальні вітрогенератори з кількістю лопатей в інтервалі від 4 до 50. Ротори вітроколів з великою кількістю лопатей можуть розвивати значний крутний момент, що, безперечно, є їх перевагою. Однак такі вітроколеса відрізняються великим моментом інерції, тому вони є повільні в обертанні [1].

Відзначені тут конструктивні особливості та технічні характеристики багатолопатних вітрогенераторів відповідають вимогам енергопостачання водяних насосів. Тому їх зазвичай використовують як альтернативні джерела електроенергії у насосних системах.



Рисунок 1.6 – Вигляд багатолопатевого ВЭУ

1.3 Вітрогенератори з вертикальною віссю обертання

Вертикальні вітрогенератори є менш ефективними порівняно з горизонтальними їх ККД в 3 рази менший, ніж у горизонтальних модифікацій [2 - 3]. Лопаті вертикального вітрогенератора обертаються перпендикулярно поверхні землі при будь-якому напрямку та силі вітру. Тому 1/2 від загальної кількості лопатей вітроколеса завжди обертається проти вітру. Це – основний недолік, оскільки половину потужності вітрового потоку не використовується,

що значно знижує їх енергоефективність. Існують також недоліки наступного типу:

- неможливість самостійного розгону лопатей;
- значне навантаження на елементи конструкції;
- лопаті повинні бути ідентичними та відповідати заданому профілю;
- підвищений рівень шуму під час роботи.

Однак вітрогенератори з вертикальним обертанням вітроколеса мають певні переваги. Наприклад, для них спрощується монтаж і експлуатація. Це пояснюється тим, що в конструкції з вертикальним вітроколесом редуктор та електрогенератор розміщуються на землі. Конструктивною перевагою є також те, що для них не потрібен флюгер. Вони відзначаються самостійною орієнтацією відносно повітряних потоків. Конструкції вертикальних вітрогенераторів мають суттєві відмінності через різні модифікації вітринних коліс. Розглянемо найбільш поширені варіанти.

а) Ротор Савоніуса

Представляє собою конструкцію, в якій лопаті ротора виконані у вигляді циліндричних поверхонь (Рис. 1.7).

Переваги ротора Савоніуса:

- здатність запускатися при слабких вітрах, рух починається при значеннях від 3 м/с;
- швидке набирання високих значень крутного моменту;
- висока надійність конструкції;
- порівняно невисока вартість виробництва.

Вітряки із ротором Савоніуса мають такий самий недолік, як і всі вертикальні вітрогенератори. Це – неповне використання вітрової енергії та, відповідно, низька ефективність перетворення повітряного потоку. Тому промислове виробництво таких пристроїв здійснюється з потужністю, яка не перевищує 4-6 кВт.

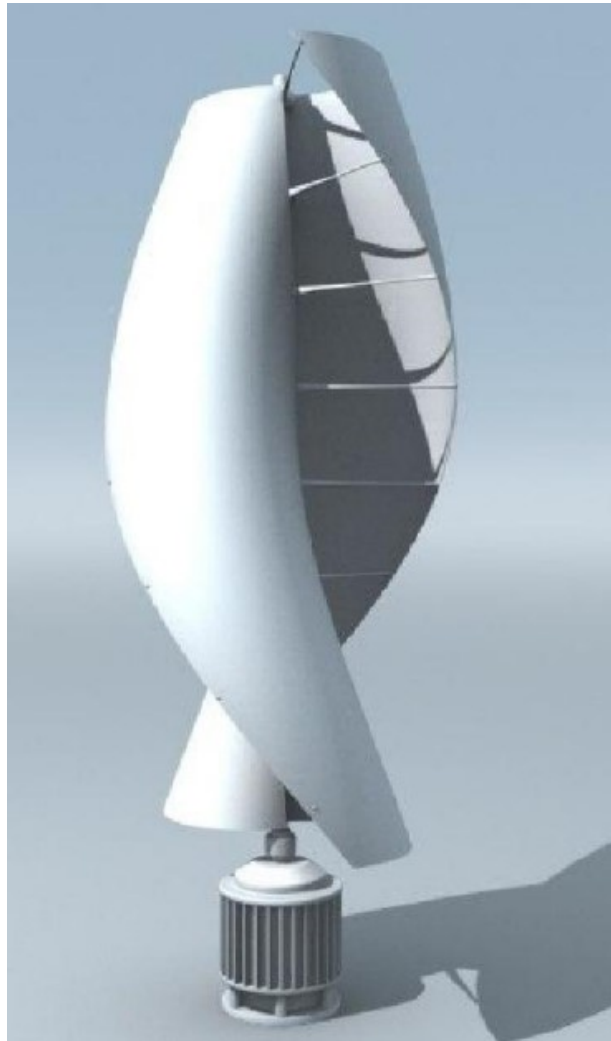


Рисунок 1.7 – Вигляд ротора Савоніуса

б) Ротор Дар'є

Вертикальний вітряк із ротором Дар'є був винайдений кілька десятиків років пізніше стандартних моделей. Зовні такий вітрогенератор має дві або три лопаті, зігнуті у формі овала (Рис. 1.8).

Вітрогенератори з ротором Дар'є є простими в виготовленні та легкими в монтажі. Їх перевагою також є самостійна орієнтація на напрям повітряного потоку. Основний вал приводу розташований близько до рівня землі, що забезпечує зручність його обслуговування. Конструкцію вітряка з ротором Дар'є відрізняє простота кінематичної схеми.

Головним недоліком такого вітрогенератора є те, що ротор потрібно запускати вручну. Його відрізняє також велике навантаження на опірні вузли,

викликане динамічним впливом повітряних потоків. Для нормальної роботи вітряка необхідно точно дотримуватися заданого профілю лопатей по всій її довжині. Вітряк з ротором Дар'є досить шумний під час роботи [3].



Рисунок 1.8– Вигляд ротора Дар'є

Головним недоліком такого вітрогенератора є те, що ротор потрібно запускати вручну. Його відрізняє також велике навантаження на опірні вузли, викликане динамічним впливом повітряних потоків. Для нормальної роботи вітряка необхідно точно дотримуватися заданого профілю лопатей по всій її довжині. Вітряк з ротором Дар'є досить шумний під час роботи [3].

в) Гелікоподібний ротор.

Гелікоподібний ротор є розвитком вертикально-вісьового вітроколеса. Його лопаті виконані у формі гелікоподібної кривої, що надає конструкції більш

рівномірне обертання і зменшує навантаження на опірну частину. Згин лопатей ротора по діагоналі сприяє швидкому набору швидкості. Ефективність використання вітрового потоку близька до горизонтальних пристроїв. В той же час це викликає підвищений шум при роботі і виробляє звукові хвилі, розташовані в короткотривалій частині звукового спектру. Гелікоподібний ротор дорогий в виробництві через складну конфігурацію профілю лопатей. (рис 1.9) [3].



Рисунок 1.9 – Вигляд гелікоподібного ротора

г) Багатолопостний ротор

Це модифікація вертикально-вісьової конструкції вітроколеса, яку доповнює зовнішнє кільце нерухомих лопатей. Така схема сприяє збільшенню корисної площі захоплення повітряного потоку, його стисненню і прискоренню,

що призводить до підвищення ефективності вітрогенератора в цілому. Крім того, конструкція чутлива до слабких впливів вітру. Багатолопостний ротор характеризується підвищеною матеріаловитратністю, що збільшує вартість вітрогенератора в цілому. Під час експлуатації конструкція вітрогенератора з багатолопостним ротором супроводжується збільшеним звуковим фоном (Рис. 1.10) [3].



Рисунок 1.10 – Вигляд багатолопатоного ротора

ВИСНОВОК ДО РОЗЛІЛУ 1

На основі вивчення конструктивних та технологічних особливостей промислових вітрогенераторів можна зробити наступні висновки.

Вертикальний вітрогенератор має менший момент початкового руху, тому він здатний працювати при найменших швидкостях вітру. Горизонтальний

вітрогенератор є більш потужним, отже, він може жити прилади значно більшою потужністю.

Вертикально-вісьові вітрогенератори встановлюються на землі, що полегшує доступ до генератора та їхнє обслуговування.

Вертикальні вітрогенератори не бояться вітру різного напрямку або бурі, оскільки вони мають мінімальний опір вітру. Ці якості дозволяють встановлювати ці вітрогенератори недалеко від житла, навіть у містах.

У середньому більшість сучасних горизонтальних вітроенергетичних установок характеризується коефіцієнтом використання вітру, який дорівнює 0,48. З результатів спеціальних досліджень випливає, що цей коефіцієнт можна збільшити. Наприклад, у деяких конструкцій вітроенергетичних установок, що відрізняються вдосконаленими аеродинамічними характеристиками, коефіцієнт використання енергії вітру може досягати значення, що дорівнює 0,593.

Горизонтально-вісьові вітрогенератори мають вищий коефіцієнт корисної дії ($\eta = 40 - 59\%$). Такі вітрогенератори можуть використовуватися як для домашнього використання, так і для промислового виробництва електроенергії. Вітрогенератори промислового призначення мають достатньо велику потужність, яка може бути збільшена в сотні разів завдяки встановленню в кожному вітропарку кількох сотень вітряків.

Певним недоліком горизонтальних вітрогенераторів можна вважати необхідність постійного пошуку вітру за допомогою флюгера, який є додатковим пристроєм у складі ВЭУ, ускладнюючи конструкцію та підвищуючи її вартість.

З урахуванням вищезазначених переваг вітрогенераторів горизонтально-вісьового типу та їхнього вже впровадженого промислового виробництва робимо висновок про доцільність встановлення цієї конструкції як альтернативного джерела енергії.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ САУ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

2.1 Класи ВЕУ та їх структурні схеми

Розрізняють три класи вітроелектричних установок в залежності від призначення і умов їх роботи по відношенню до енергосистеми, до якої вони підключені, і способу управління (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 Класи вітроустановок

Клас	Потужність	Ступінь автономності	Режим роботи та способи управління
А	$P_{\text{ВЕУ}} \gg P_{\text{М}}$	Автономна ВЕУ	Шагом вітроколеса або баластного навантаження
В	$P_{\text{ВЕУ}} \approx P_{\text{М}}$	Паралельна робота ВЕУ і дизель-генератора сумірної потужності	Роздільна або спільна робота ВЕУ і дизель-генератора
С	$P_{\text{ВЕУ}} \ll P_{\text{М}}$	Мережний режим роботи в потужній енергосистемі	Шагом вітроколеса, системою збудження, перетворенням роду струму, зміною ковзання асинхронного генератора

У класі А потужність вітроелектрогенератора ВЕУ в локальній енергосистемі є визначальною, тобто $P_{\text{ВЕУ}}$ багато більше сумарної потужності $P_{\text{М}}$ інших генераторів системи.

До класу А відносяться автономні одногенераторні вітроустановки, не підключені до енергосистеми для паралельної роботи. Потужність таких вітроустановок використовується для освітлення, електроживлення маяків, засобів зв'язку та ін. і, як правило, не перевищує 5 кВт. Якщо енергія таких ВЕУ використовується для опалювання, то їх потужність може досягати 20 кВт і більше.

У автономних ВЕУ використовуються електрогенератори різних типів, найчастіше багатополюсні генератори з постійними магнітами, класичні синхронні генератори з нестабілізованими і стабілізованими електричними параметрами на виході, асинхронні генератори з самозбудженням або допоміжним збудженням і т.п. Вартість таких ВЕУ багато в чому залежить від вибору системи управління електричним генератором.

При простих електричних схемах напруга і частота (у разі генератора змінного струму) на виході генератора будуть нестабільними і нестандартними, проте енергія з успіхом може бути утилізована за допомогою випрямлячів, електричних акумуляторів і нагрівальних пристроїв. Потреби в якісній електроенергії із стабілізованими параметрами можна забезпечити застосуванням транзисторних або тиристорів перетворювачів (інверторів), що живляться від акумуляторів. У ряді випадків можна отримати якісні параметри усієї електроенергії, що виробляється, використовуючи або механічне управління лопатями вітроколеса в цілях стабілізації частоти його обертання, або електричне управління.

При електричному управлінні постійність частоти обертання вітроколеса забезпечується зміною електричного навантаження на виході генератора (застосуванням баластного навантаження). При такому способі стабілізації частоти обертання енергія вітру використовується ефективніше, оскільки лопаті вітроколеса працюють в оптимальному режимі, а застосування сучасного електронного устаткування робить цей спосіб надійнішим і дешевшим, чим механічне управління.

Для ВЕУ класу В характерною є зразкова співмірність потужностей ВЕУ і дизель-генератора (ДЕС). Такий варіант звичайний для локальних енергосистем у віддалених областях. У таких системах застосування ВЕУ дозволяє заощадити дизельне паливо. Управління генераторами і досягнення якості електроенергії, ВЕУ, що виробляється, можна досягти тими ж технічними засобами, що і в системах класу А, проте для отримання найбільшого ефекту можливе застосування інших рішень, що ґрунтуються на застосуванні систем акумуляції

енергії (електричні акумулятори, водяні перетворювачі-акумулятори, гідроакумуляуючі станції та ін.) при зв'язаному управлінні ВЕУ, ДЕС і системами акумуляції.

У класі С, ВЕУ підключена до системи набагато більшої потужності, ніж сама ВЕУ, працює паралельно з цією енергосистемою і називається мережевою. Це область системної вітроенергетики, тобто область великомасштабного використання енергії вітру, яка може при відповідному розвитку, впливати на стан енергетичного балансу усєї країни. В цьому випадку доцільно використати ВЕУ великих одиничних потужностей (від 1 до 10 МВт), зібраних у вітроенергетичні станції (ВЕС).

Для ВЕУ цього класу загострюються всі проблеми, оскільки ВЕУ даного класу мають великі геометричні розміри і масу, а, отже, і напружені режими роботи механічного устаткування. У цьому випадку електроенергія ВЕУ використовується безпосередньо або повністю подається в енергосистему. При слабкому вітрі і в ситуації коли нема вітру споживачі забезпечуються електроенергією від енергосистеми. Найбільш дешевим і, можливо, безпечним типом вітроелектрогенератора в цьому випадку є асинхронний генератор змінного струму, підключений безпосередньо в енергосистему і ведений нею.

При цьому частота обертання вітроколеса може не більше ніж на 10% перевищувати частоту, відповідну номінальній частоті електромережі. За даними статистики, основу сучасної вітроенергетики складають ВЕУ класу С, що працюють паралельно з енергосистемою. Їх частка за потужністю становить понад 95% від сумарної встановленої потужності ВЕУ. Паралельна робота з мережею дає можливість збільшувати одиничну потужність ВЕУ, знижувати вартість електроенергії, забезпечує необхідну якість енергії і надійність електропостачання споживачів.

Структурні схеми ВЕУ та режими їх роботи в класах А, В і С різні. При розгляді конструктивних схем розрізняють тип вітродвигуна, спосіб управління ним у робочому і пусковому режимах. По кожному із зазначених елементів необхідно зробити оптимальний вибір на основі порівняльного аналізу

можливих варіантів. Так, для установок класу А і В, що функціонують в автономному режимі або паралельно з традиційними джерелами енергії, внаслідок нелінійності і нестационарності вольт-амперних характеристик ВЕУ потрібне використання спеціалізованих напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують стандартні параметри якості електричної енергії.

Залежно від орієнтації вісью обертання по відношенню до напрямку вітрового потоку вітротурбіни ВЕУ можуть бути з горизонтальною вісью обертання, паралельною напрямку вітрового потоку, і з вертикальною вісью обертання, перпендикулярною напрямку вітрового потоку.

В даний час найбільшого поширення набули горизонтально-вісьові пропелерні ВЕУ, що використовують підйомну силу лопаті. Вони вважаються більш ефективними зважаючи на високий коефіцієнт використання енергії вітру ($C_p = 0,35 \dots 0,45$), мають достатній пусковий момент і легко розкручуються, включаючись в роботу при швидкостях вітру 3...5 м/с.

Вітроелектроустановки вертикально-вісьового типу прості і надійні; зручність монтажу, обслуговування та ремонту обладнання обумовлюють їх мінімальну вартість. Це стосується насамперед ВЕУ малої і середньої потужності, що працюють в районах з високим вітровим потенціалом.

За наданим описом, горизонтальний вітрогенератор, що обговорюється, відноситься до класу "В" згідно з класифікацією.

Для автономних ВЕУ вимоги і прийняті технічні рішення по структурі ВЕУ, що пред'являються можуть істотно відрізнитися від тих, які повинні працювати паралельно з енергосистемою. Це пояснюється тим, що в даному випадку необхідні стандартами значення напруги і частоти джерела енергії та їх стабільність не задаються енергосистемою, а повинні бути забезпечені системами автоматичного керування самою ВЕУ. Аналіз показує, що автономні ВЕУ можна розділити на дві групи за принципом отримання заданої частоти джерела:

- 1) зі стабілізацією частоти, одержуваної в генераторі ВЕУ;

2) з перетворенням змінної частоти, одержуваної в генераторі, в задану постійну частоту.

Пропелерні ВЕУ середньої та великої потужності, як правило, повинні мати спеціальний механізм зміни кута повороту лопатей вітроколеса в процесі регулювання і систему автоматичного управління цим механізмом, а також (горизонтально-вісьові установки) механізм орієнтації гондоли в напрямку вітру і систему управління ним.

На (Рис. 2.1) представлена загальна структурна схема вітроенергетичної установки, що складається з аеродинамічного, механічного, електричного, а також перетворювального модулів і системи управління.

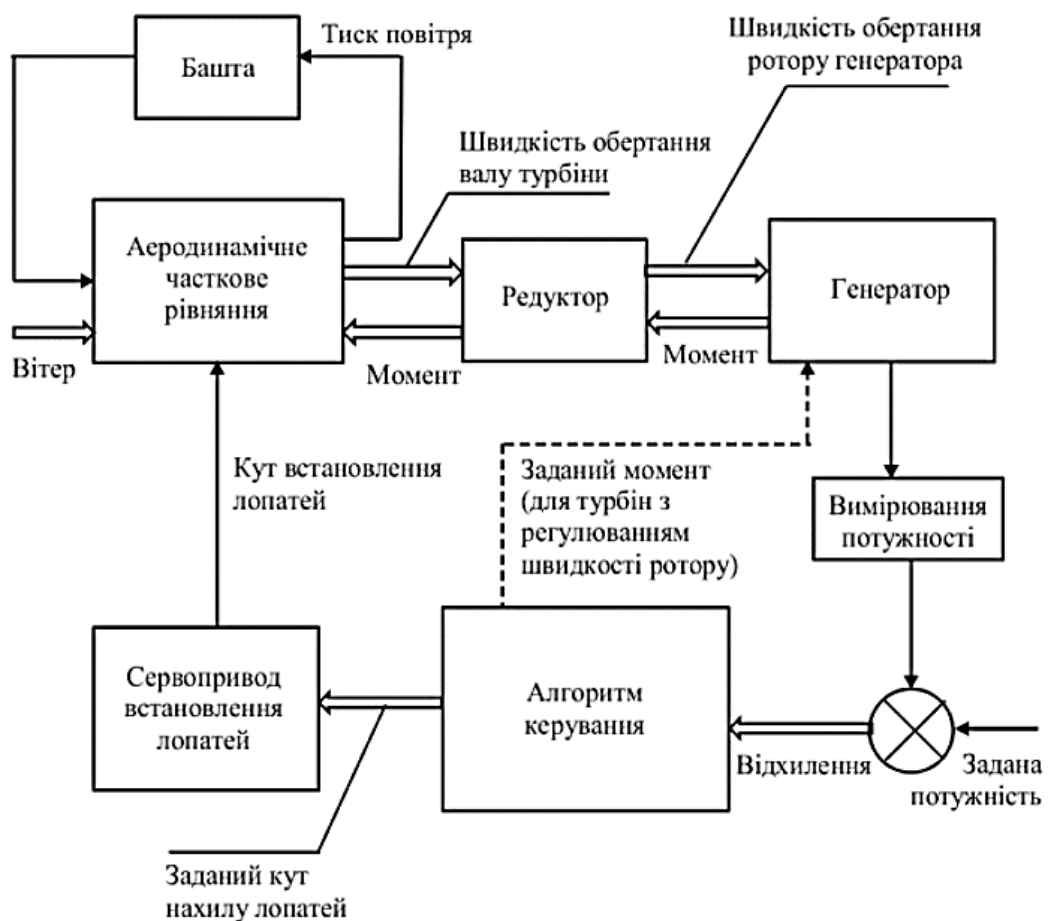


Рисунок 2.1 - Загальна структурна схема вітроенергетичної установки

Призначення модулів структурної схеми ВЕУ:

- аеродинамічний модуль (ротор з лопатями або вітродвигун) відповідає за перетворення кінетичної енергії вітру в механічну;
- механічний модуль (гальмо, коробка передач, високошвидкісний і низькошвидкісний вали) відповідає за перетворення механічної енергії з вихідними параметрами в механічну енергію з параметрами, необхідними для роботи генератора;
- електричний модуль (генератор) відповідає за перетворення механічної енергії в електричну;
- перетворювальний модуль відповідає за отримання електричної енергії з заданими параметрами;
- система управління (анемометр, контролер, флюгер, привод гондоли та привод лопатей) – відповідає за орієнтацію вітроустановки на вітер і максимальне використання енергії вітру.

Найбільш відповідальною частиною ВЕУ, що визначає в значному ступені активність її роботи, є лопаті вітроколеса, які в сучасних потужних горизонтально-вісьових ВЕУ мають довжину 30-50 м. Цим лопатям вітродвигуна необхідно забезпечити стійкість від утомних напруг, оскільки вони піддаються впливу змінного моменту, під час одного обороту від мінімуму (нижнє положення лопаті) до максимуму (верхнє положення лопаті).

Основні труднощі в технології виготовлення лопаті складаються в необхідності забезпечення розрахункового профілю лопаті, що змінюється по довжині. Крім того у лопаті необхідно "вмонтувати" провідник блискавковідводу, а також забезпечити проходження струму блискавки мимо підшибника. Лопаті забезпечена механізмом повороту, що іноді діє на поворот всієї лопаті або її кінцевої частини. Для лопаті використовуються найсучасніші матеріали (пластик, вуглепластик), що забезпечують міцність і мінімально можливу вагу.

Іншим об'єктом використання високих технологій є система управління ВЕУ. Сучасна потужна вітроенергетична установка повністю автоматизована з

використанням найсучаснішої елементної бази, комп'ютерної техніки та програм. Всі основні операції здійснюються без участі людини.

До базових функцій системи управління слід віднести:

- пуск і зупинка в нормальному режимі ВЕУ від датчика швидкості вітру;
- зупинка ВЕУ при аварійних режимах;
- зміна швидкості обертання (для ВЕУ з постійною або ступінчатою зміною швидкості обертання);
- включення в мережу і набір потужності;
- реєстрація та накопичення даних про швидкість вітру, потужності у виробленні електричної енергії в різних часових інтервалах: доба, місяць, рік;
- реєстрація та сигналізація про всі несправності;
- передача даних в центр управління енергосистеми, а в багатьох випадках і виробнику;
- установка (поворот) вітроколеса в задане положення по відношенню до напрямку вітру і розкручення кабелю.

2.2 Дослідження побудови систем автоматичного регулювання, управління і захисту ВЕУ

При розробці систем автоматичного управління режимами роботи ВЕУ необхідно враховувати наступні специфічні особливості вітрового потоку:

- статичний характер розподілу в часі і просторі;
- низькі питомі енергетичні показники в порівнянні з традиційними джерелами енергії;
- непередбачуваність різких змін швидкості і значний рівень турбулентності;
- неможливість регулювання рівня наявній потужності;
- зміна профілю швидкості з висотою.

Тому управління електромеханічної системою, що виробляє електроенергію, використовує як джерело енергії вітрової потік, і контроль над нею являють собою складну задачу.

Система автоматичного регулювання режимами роботи ВЕУ в загальному випадку повинна включати в себе дві взаємопов'язані основні підсистеми управління:

1) підсистему автоматичного управління і контролю механічних параметрів;

2) підсистему автоматичного управління і контролю електромагнітних параметрів, їх спільне функціонування здатне забезпечити автоматичне підтримання заданого режиму роботи ВЕУ і ефектне використання вітро-енергетичних ресурсів.

Підсистема автоматичного управління і контролю механічних параметрів. До основних завдань підсистеми відносяться:

- орієнтування захоплюваної поверхні вітродвигуна на напрям поширення вітрового потоку;
- забезпечення надійного пуску і ефективного гальмування вітродвигуна;
- управління кутом конусності лопатей вітродвигуна;
- регулювання і контроль аеродинамічного крутного моменту;
- підтримка розвиваючої потужності на заданому рівні в залежності від діапазону швидкостей вітрового потоку;
- перекид лопатей у флюгерне положення при швидкостях вітрового потоку вище максимальної;
- контроль кутової швидкості обертання вітродвигуна;
- контроль швидкості вітрового потоку;
- контроль стану лопатей вітродвигуна для своєчасного виявлення вогнищ їх деформації і руйнування;
- аварійне відключення і гальмування ВЕУ у разі несправності механічної частини.

Блок управління кута орієнтування для ВЕУ середньої та великої потужності може являти собою блок порівняння двох сигналів, який визначає неузгодженість між сигналом, що характеризує реальний стан вісью горизонтально-вісьового вітродвигуна в даний момент, і сигналом дійсного напрямку вітрового потоку. При цьому управління приводом орієнтування таких ВЕУ повинно здійснюватися зміною напрямку вітрового потоку, пов'язаного з проходженням фронту повітряної маси, а не при його короткочасних випадкових флуктуацій, і по найкоротшому шляху. При постійній швидкості вітрового потоку величина тиску на лопатях вітродвигуна значно змінюється через збільшення максимальної складової вектора швидкості з висотою. Тому підсистема автоматичного регулювання та контролю механічних параметрів для вітродвигунів значних розмірів повинна включати в себе блок управління кута конусності, оскільки відповідна його зміна є найбільш прийнятним методом стабілізації впливу цього явлення на механічні напруги в лопатях вітродвигуна.

Основною вимогою до підсистеми автоматичного регулювання та контролю механічних параметрів в робочому діапазоні швидкостей вітрового потоку є отримання механічної потужності на валу вітродвигуна при заданому значенні кутової швидкості обертання. Через значну інерційності вітродвигуна домогтися цього без застосування спеціального блоку управління і контролю кута установки лопатей практично неможливо, так як відсутність останнього призведе до того, що випадкові коливання швидкості вітрового потоку будуть викликати коливання кутової швидкості обертання. При цьому вітродвигун не може трансформувати енергію окремих нетривалих флуктуацій швидкості вітрового потоку, так як для цього було б необхідно, щоб підсистема автоматичного регулювання та контролю механічних параметрів регулювала крутний момент на валу пропорційно швидкості зміни вітрового потоку.

Система автоматичного регулювання повинна так регулювати вироблену потужність, щоб відстежувати тільки середні значення змін швидкості вітрового потоку (а не короткочасні пульсації швидкості вітрового потоку), а коефіцієнт швидкохідності при цьому підтримувався оптимальним у режимі змінюваної

кутової частоти обертання. Таким чином, у загальному випадку блок управління і контролю кута установки лопатей може являти собою:

- замкнутий контур автоматичного керування положенням лопаті. При цьому він управляє приводом кута установки лопатей до тих пір, поки не досягається значення заданого коефіцієнта швидкохідності;

- замкнутий контур автоматичного управління частоти обертання вітродвигуна. При цьому кут установки лопатей змінюється до тих пір, поки не досягається задана частота обертання вітродвигуна;

- замкнутий контур автоматичного управління потужністю. Кут установки лопатей змінюється до тих пір, поки потужність, що розвивається не стає рівною заданій.

Для підвищення ефективності регулювання і стабілізації навантажень, що діють на лопаті, контур автоматичного керування швидкістю обертання вітродвигуна повинен включати в себе в якості підлеглого контур управління кута положення лопаті. При цьому забезпечується автоматичне регулювання, як частоти обертання, так і аеродинамічного крутного моменту.

Принципово можливе створення двох схем управління кутовою частотою обертання вітродвигуна:

- за швидкістю вітрового потоку V і кутовою частотою обертання вала вітродвигуна;

- за крутним моментом і кутовою частотою обертання вала вітродвигуна.

Перша схема (Рис. 2.2, а) регулює потужність так, щоб частота обертання вала вітродвигуна ВД (датчик частоти обертання ДС) (сигнал $I(\omega)$) змінювалася пропорційно швидкості вітрового потоку. Якщо відношення кутової частоти обертання вала вітродвигуна і швидкості вітрового потоку (сигнал $I(Z_\phi)$) не відповідає заданому коефіцієнту швидкохідності Z_3 (сигнал $I(Z_3)$), то виробляється сигнал неузгодженості $I(\Delta Z)$. При цьому регулювання відбувається до тих пір, поки він не стане рівним нулю.

Сигнал про швидкість вітрового потоку від датчика швидкості вітрового потоку (ДВ) $I'(v)$ повинен проходити через фільтр (Ф), щоб у блок порівняння (БП) надходив тільки усереднений сигнал $I(v)$, що не залежить від турбулентної складової. Недоліком цієї схеми є труднощі вибору місця установки датчика швидкості (ДШ) вітрового потоку. Потік в околиці вітродвигуна значно спотворюється і відрізняється високим рівнем турбулентності, тому датчик ДВ необхідно встановлювати на деякій відстані від вітродвигуна, внаслідок чого між істинною швидкістю вітрового потоку безпосередньо перед площиною обертання вітродвигуна і показниками датчика буде певна похибка.

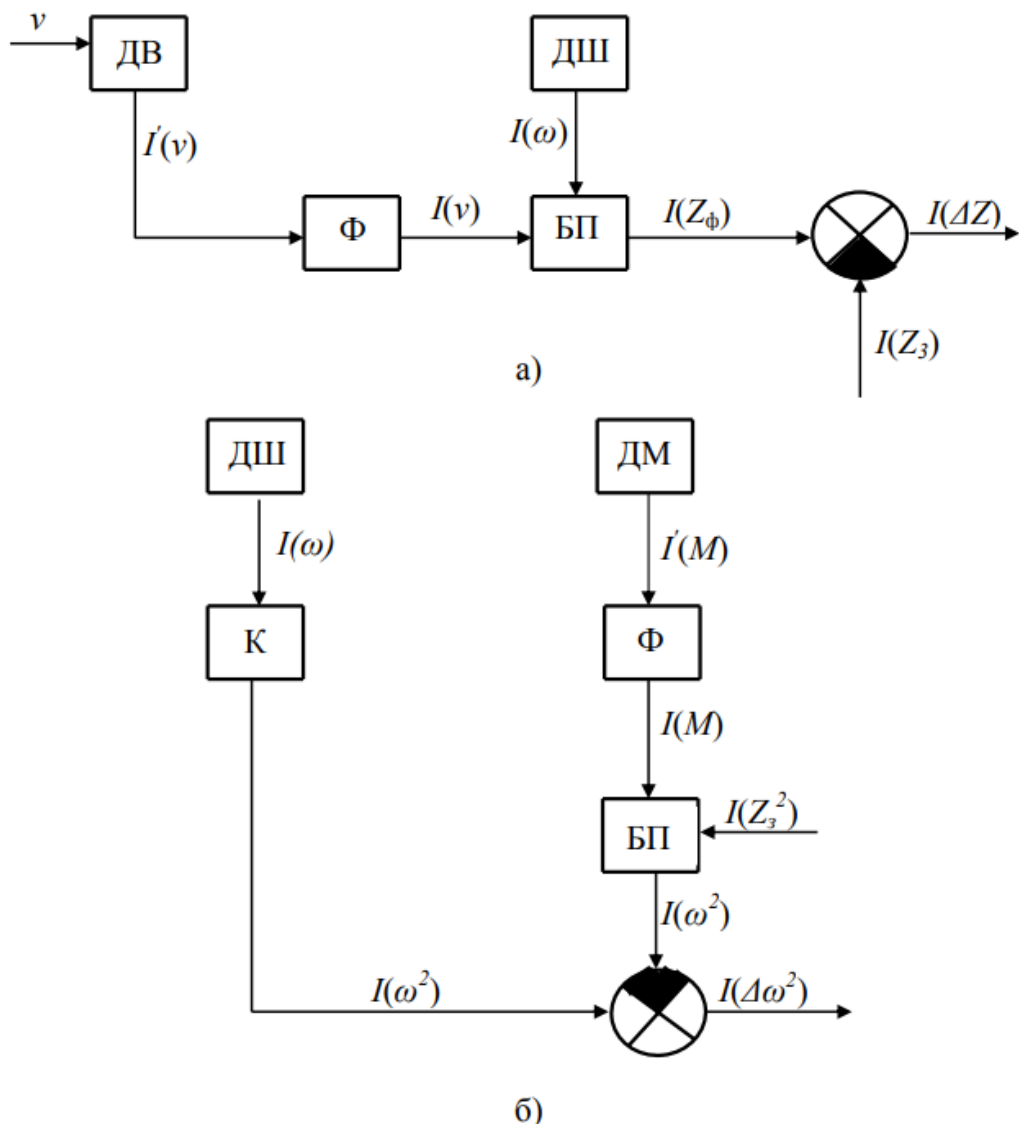


Рисунок 2.2 – Схеми управління

де a – за швидкістю вітрового потоку і кутової частоти обертання вала ВД; b – за крутним моментом і кутовою швидкістю обертання вала ВД

Друга схема (Рис. 2.2, б) дозволяє уникнути похибки, пов'язаної з розташуванням датчика швидкості вітрового потоку. При цьому, оскільки крутний момент вала вітроподвигуна змінюється пропорційно квадрату швидкості потоку, сигнал датчика крутного моменту (ДМ) слід усереднювати за допомогою фільтру (Ф) і надалі узгоджувати його з сигналом датчика кутової швидкості обертання вала вітроподвигуна (ДШ) за допомогою квадратора (К).

Недолік цієї схеми полягає в тому, що різке збільшення швидкості вітрового потоку призводить до зниження коефіцієнта використання енергії вітру, а, отже, до зменшення крутного моменту замість його збільшення. В результаті можлива помилка в роботі системи автоматичного регулювання.

Для того, щоб позбутися цього недоліку, необхідно, щоб механічна система ВЕУ забезпечувала демпфіруючий вплив, вітрової потік володів пологою характеристикою, а фільтр мав спеціально розроблену для цієї схеми конструкцію і характеристики.

На підставі наведеного порівняння двох попередніх схем доцільно використовувати систему, в якій вхідними сигналами є швидкість вітрового потоку $I(v)$, крутний момент на валу вітроподвигуна $I(M)$ і кутова частота обертання вала вітроподвигуна $I(\omega)$ (Рис. 2.3). При цьому датчик вітрового потоку ДВ повинен встановлюватися не тільки перед площиною обертання вітроподвигуна, але і над нею.

При регулюванні частоти обертання вітроподвигуна повинен визначатися сигнал неузгодженості $I(\Delta\omega^2)$ між заданою частотою обертання ω_3 та істинним її значенням ω_3 . Така побудова підсистеми автоматичного регулювання та контролю механічних параметрів забезпечує безпосереднє регулювання потужності, що передається на вал електрогенератора.

При цьому вона повинна виробляти сигнал на припинення обертання вітроподвигуна у випадку занадто високій швидкості вітрового потоку і

автоматично відновлювати роботу ВЕУ, коли його швидкість лежить у встановленому діапазоні експлуатації.

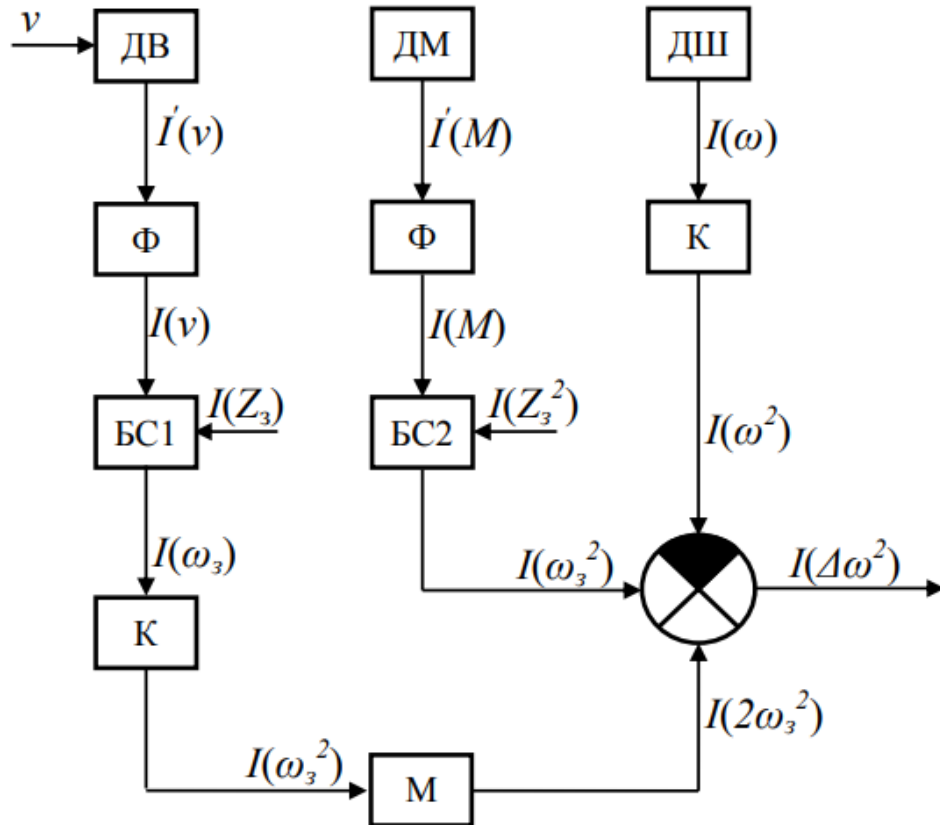


Рисунок 2.3 – Багатоканальна схема управління ВЕУ

Підсистема автоматичного управління і контролю електромагнітних параметрів повинна вирішувати такі основні завдання:

- регулювати і контролювати параметри електричних кіл ВЕУ;
- забезпечувати зміну амплітуди, частоти і фази напруги збудження;
- підтримувати якість вироблюваної електроенергії відповідно до встановлених норм;
- забезпечити синхронізацію ВЕУ з енергосистемою;
- здійснювати при необхідності роботу ВЕУ в автономному режимі;
- контролювати температуру електричного генератора;
- забезпечувати захист для запобігання нестійкої роботи і аварії, а також відключати ВЕУ при несправності електричної частини.

Незважаючи на те, що контур управління кута установки лопаті являє собою надійну систему запобігання генератора від перевантажень в результаті різких змін швидкості вітрового потоку і обмежує при цьому механічну потужність номінальним значенням, поліпшення роботи ВЕУ на енергосистему може бути досягнуто тільки за рахунок ефективного регулювання відповідних електромагнітних параметрів.

Необхідність підсистеми автоматичного управління і контролю електромагнітних параметрів насамперед пояснюється тим, що для енергосистеми неприпустимі стрибкоподібні зміни частоти вироблюваної ВЕУ потужності, а, отже, і неможливості підсистеми автоматичного регулювання та контролю механічних параметрів самостійно згладжувати ці коливання. Тому регулювання останніх повинне використовуватися додатково до управління кута установки лопатей, що забезпечить прийнятну якість вироблюваної електричної енергії.

Найбільш ефективно регулювання забезпечується, коли керуючий вплив пропорційно квазіоптимальної комбінації відповідних змін швидкості, прискорення й крутного моменту валу електричного генератора ВЕУ. При цьому забезпечується мінімальний час на відпрацювання необхідного керуючого впливу. Така система повинна використовуватися в основному в синхронних ВЕУ, що забезпечить підтримання оптимальних експлуатаційних режимів і запобігне перевантаження генератора. Спрощення регулювання та використання, зокрема, тільки управління кута установки лопатей або кута установки зі зворотним зв'язком по частоті обертання, безумовно, реалізується трохи легше, але призводить до істотного погіршення якості перехідних процесів в електромеханічній системі ВЕУ. Крім того, ефективно регулювання параметрів електричних кіл ВЕУ забезпечить істотне згладжування характеристик вироблюваної електромагнітної потужності при пульсаціях кутової частоти обертання і крутного моменту на валу електричного генератора.

Для забезпечення точної синхронізації ВЕУ з енергосистемою в режимі змінюваної кутової частоти обертання вітрогенератора необхідно, за допомогою

інвертора або перетворювача частоти, привести частоту вироблюваної електричної енергії до частоти промислової і при стійких і співпадаючих фазах з напругою лінії електропередачі ВЕУ повинна підключатися до енергосистеми. Причому синхронізацію можна набагато вдосконалити при обмеженні перехідних процесів за рахунок ефективності управління частотою обертання і застосування автоматичного синхронізатора. При досягненні вітродвигуна швидкості фіксації підсистема автоматичного регулювання та контролю механічних параметрів повинна виробити сигнал на переключення системи автоматичного управління режимами роботи ВЕУ з режиму управління швидкістю в режим управління потужністю. У режимі керування потужністю повинен сформуватися сигнал корекції, який надходить до блоку управління і контролю кута установки лопатей і приводить до відповідної зміни стратегії регулювання кута установки лопатей.

Перевантаження електричного генератора веде до його перегріву, тому сигнал про це повинен надходити в підсистему автоматичного управління і контролю електромагнітних параметрів, яка, в свою чергу, або знижує вироблювану потужність, або, в екстрених випадках, відключає ВЕУ від навантаження.

Підсистема автоматичного управління і контролю електромагнітних параметрів повинна обмежувати граничні коливання напруги, що викликаються пуском, гальмуванням, розсинхронізація та пульсаціями швидкості вітрового потоку для забезпечення прийнятних експлуатаційних параметрів, має спрацьовувати автоматична система захисту.

Аварійне вимикання вітроагрегата в екстрених випадках, залежно від характеру аварійної ситуації, що склалась, можна використовувати відключення ВЕУ від енергосистеми, механічне гальмування вітродвигуна, динамічне гальмування електричного генератора. Під час відключень і перемикань необхідно оберегти обладнання ВЕУ і навантаження від стрибків струму, надлишкових напруг і зміни частоти.

Тому в системі захисту широко використовуються запобіжники, автоматичні вимикачі та реле для управління напругою і контролю перемикачів в колі.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

За наданим описом, горизонтальний вітрогенератор, що розглядається у магістерській роботі, відноситься він до класу "В" згідно з класифікацією. Такий вітрогенератор використовується для автономних одногогенераторних вітроустановок, які не підключені до енергосистеми для паралельної роботи.

Тож обравши тип та клас вітрогенератора можна більш детально описати побудову систем автоматичного керування ВЕУ.

На основі порівняльного аналізу двох схем доцільно використання системи, де вхідним сигналом є швидкість вітрового потоку, крутний момент на валу вітродвигуна і кутова частота обертання вала вітродвигуна. Де датчик вітрового потоку ДВ повинен бути розміщений перед та вище площини обертання.

Під час регулювання частоти обертання вітродвигуна важливим є використання сигналу невідповідності між частотою обертання та її фактичним значенням. Отже така конфігурація підсистеми автоматичного регулювання і контролю механічних параметрів регулює передану потужність на вал електрогенератора. При цьому система генерує сигнал для зупинки обертання вітродвигуна у випадку занадто високої швидкості вітрового потоку і автоматично відновлювати роботу ВЕУ, коли його швидкість знаходиться в установленому діапазоні експлуатації.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВІТРОГЕНЕРА

3.1 Змістовна та графічна моделі об'єкта стабілізації

Автономні вітрогенератори складаються з генератора, щогли, контролера, інвертора, хвостової частини та акумуляторної батареї. У типових вітряних установках є 3 лопаті, які кріпляться до ротора. При обертанні ротора генератор створює трифазний змінний струм, який надсилається до контролера. Далі цей струм перетворюється у постійну напругу та постачається до акумуляторної батареї.

Сучасні домашні інвертори оснащені модулем для підключення постійного струму, спеціально розробленим для сонячних панелей або вітряних турбін. Таким чином, вітряна турбіна може бути інтегрована в побутову електромережу, зменшуючи споживання електроенергії з мережі. Вітер рухає ротор. Згенерована електроенергія подається від контролера до батарей. Інвертор перетворює напругу на клеммах акумулятора [4].

Загальну схему роботи вітрогенератора представлено на (Рис. 3.1).

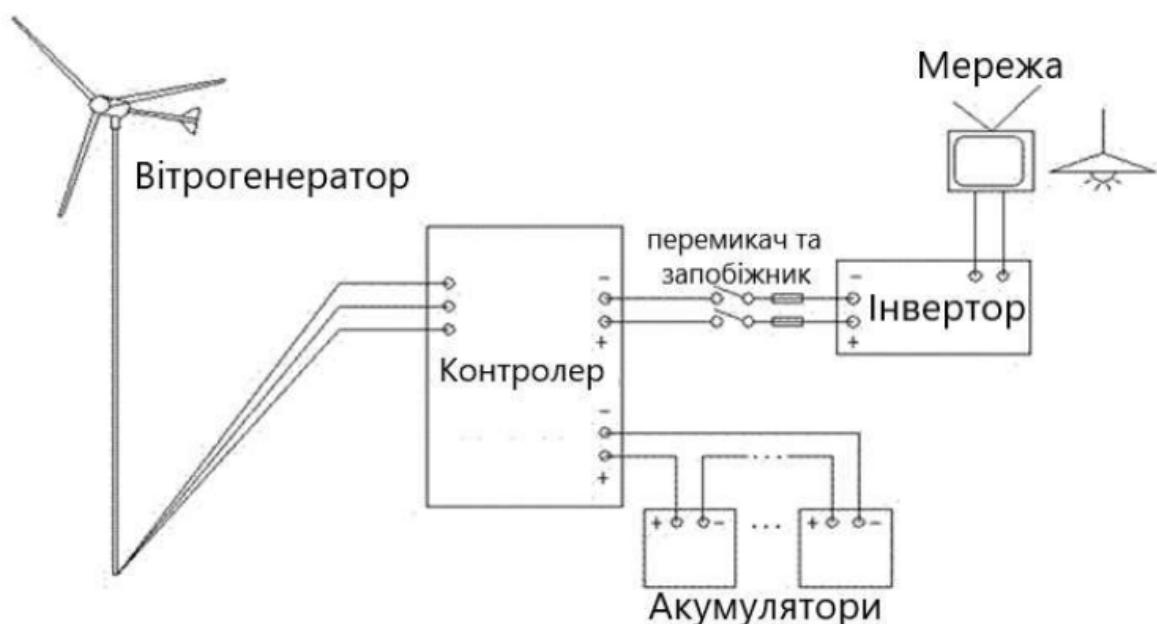


Рисунок 3.1 – Схема роботи вітрогенератора

Основний принцип функціонування усіх вітряних турбін полягає у руху вітроколеса з лопатями під дією повітряного потоку. Крутний момент від вітряної турбіни передається через систему трансмісії на генераторний вал, який виробляє електроенергію.

Функціональна схема керованого об'єкта представлена на (Рис. 3.2). Щоб зробити аналіз більш ілюстративним, об'єкт управління (горизонтально-вісьова вітряна турбіна з обертовими лопатями) відображають як послідовне з'єднання відповідних блоків, обертові лопаті – ротор вітряної електроустановки та блок створення повного крутного моменту - блок електрогенератора [4].

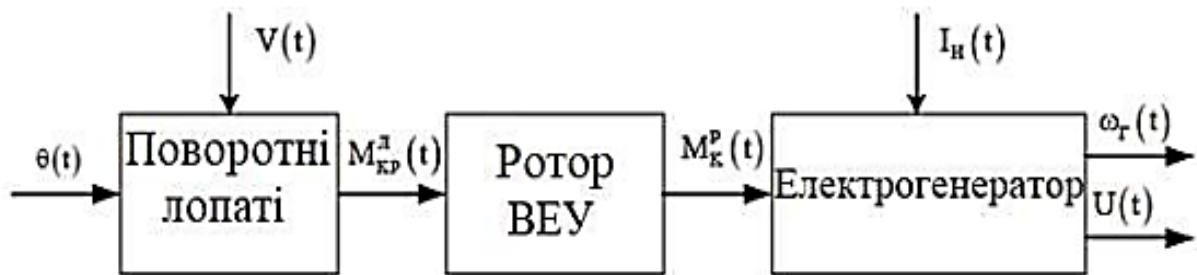


Рисунок 3.2 – Функціональна схема вітрогенератора демонструє основні функціональні елементи та їх взаємозв'язок в системі вітроенергетичної установки.

На рисунку 3.2 прийняті наступні позначення:

- 1) $V(t)$ – швидкість вітру;
- 2) $\omega_r(t)$ – кутова швидкість обертання ротора електрогенератора;
- 3) $\theta(t)$ – кут повороту лопаті;
- 4) $I_n(t)$ – струм навантаження електрогенератора;
- 5) $U(t)$ – напруга на виході генератора;
- 6) $M_{кр}^л(t)$ – крутний момент, створюваний лопатою;
- 7) $M_{кр}^р(t)$ – загальний крутний момент, що генерується ротором вітрогенератора

3.2 Створення математичних моделей для стабілізації вітроенергетичної установки з урахуванням нелінійних та лінеаризованих ефектів

Крутний момент, породжений вітровим потоком на роторі:

$$M_{кр}^p(t) = \frac{C_p}{\lambda} * \frac{\rho_p}{2} * R^3 * V^3, \quad (3.1)$$

де:

- 1) C_p – коефіцієнт використання енергії вітру (коефіцієнт потужності);
- 2) R – радіус ВЕУ;
- 3) V – швидкість вітру;
- 4) ρ – щільність повітря;
- 5) λ – швидкодія ротора.

Швидкість обертання вітрогенератора обумовлена конструкцією ротора та виражається у визначенні:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V}, \quad (3.2)$$

де:

- 1) ω – кутова швидкість обертання ротора.

Ефективність використання вітроенергії не проявляє лінійну залежність і змінюється відповідно до налаштувань швидкості та кута повороту лопатей:

$$C_p = f(\lambda, \theta), \quad (3.3)$$

Для того, щоб математично виразити коефіцієнт використання вітру C_p досліджуємо його зміну при різних кутах відхилення віссю обертання вітротурбіни від напрямку вітру.

Потужність вітроколеса, коли воно відводиться від напрямку вітру, змінюється пропорційно кубу синуса кута відхилення віссю вітроколеса від напрямку потоку.

Таким чином, можна припустити, що цей ефект схожий на вплив вітру на вітряне колесо, коли лопаті відводяться від напрямку вітру на однаковий кут. Враховуючи це, вираз для коефіцієнта використання вітру набуває такий вигляд (формула 3.4) [4]:

$$C_p = C_{p_0} * \cos\theta^3, \quad (3.4)$$

де:

- 1) θ – кут повороту лопатей щодо віссю маху;
- 2) C_{p_0} – коефіцієнт використання вітру при $\theta = 0$.

Тоді вираз (3.1) набуває вигляд:

$$M_K^p = \frac{\pi\rho}{2} * R^2 * \frac{V^4}{\omega} * C_{p_0} * \cos\theta^3, \quad (3.5)$$

або

$$M_K^p = K_p * \frac{V^4}{\omega} * C_{p_0} * \cos\theta^3, \quad (3.6)$$

де:

- 1) K_p – постійний коефіцієнт для даної конструкції вітрогенератора.

Засновуючись на фундаментальних принципах механіки, рух ротора вітряної турбіни можна охарактеризувати за допомогою наступного математичного виразу (формула 3.7):

$$I_{\text{Пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{к}}^{\text{р}} - M_{\text{с}} - M_{\text{а}} - M_{\text{Тр}}, \quad (3.7)$$

Де:

- 1) $M_{\text{Тр}}$ – момент тертя;
- 2) $M_{\text{с}}$ – момент опору електрогенератора;
- 3) $I_{\text{Пр}}$ – приведений до вісью ротора момент інерції всіх рухомих частин;
- 4) $M_{\text{а}}$ – аеродинамічний момент опору.

Оскільки сумарний момент $M_{\text{а}}$ та $M_{\text{Тр}}$ набагато менше $M_{\text{с}}$, обумовленого електрогенератором, то вираз (3.6) приймає вигляд (формула 3.8):

$$I_{\text{Пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{к}}^{\text{р}} - M_{\text{с}}, \quad (3.8)$$

В якості електрогенератора, залежно від його потужності, виду струму та умов роботи (незалежно від власного навантаження або мережі), можуть бути використані генератори змінного струму або інші типи, наприклад, вентильні генератори.

Незважаючи на істотні конструктивні відмінності, спільним для них є те, що при заданому навантаженні, наприклад, електричній потужності (P) або струмі ($I_{\text{н}}$), вони потребують відповідної стабілізації, перш за все, кутової швидкості обертання якоря або ротора.

Отже, можна відзначити, що момент опору електрогенератора в загальному випадку є функцією двох основних змінних [5].

$$M_c = M_c(P, \omega); \quad (3.9)$$

або

$$M_c = M_c(I_H, \omega); \quad (3.10)$$

У даному випадку є вплив незначного коливання швидкості вітру та навантаження електрогенератора.

Це означає, що спостерігаються дрібні флуктуації позиції вітряної турбіни навколо точки рівноваги (формула 3.11):

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = \omega_0 + \Delta\omega \\ V = V_0 + \Delta V \\ \theta = \theta_0 + \Delta\theta \\ I_H = I_{H0} + \Delta I \\ \Delta M_K^p = M_K^p(V, \omega, \theta) - \dot{M}_{K0}(V_0, \omega_0, \theta_0) \\ \Delta M_c = M_c(I_H, \omega) - M_{c0}(I_{H0}, \theta_0) \end{array} \right. , \quad (3.11)$$

Далі, враховуючи, що в стані рівноваги маємо $\dot{M}_{K0} = M_{c0}$, та розкладаючи функції у ряда Тейлора згідно з відповідними змінними та обмежуючи себе лише початковими членами, отримують [5] наступне (формула 3.12 – 3.13):

$$\Delta M_K^p = \frac{dM_K^p}{dV} \Delta V + \frac{dM_K^p}{d\omega} \Delta\omega + \frac{dM_K^p}{d\theta} \Delta\theta; \quad (3.12)$$

$$\Delta M_c = \frac{dM_c}{dI_H} \Delta I_H + \frac{dM_c}{d\omega} \Delta\omega. \quad (3.13)$$

тоді:

$$\left\{ \begin{array}{l} T\Delta\omega + \overline{\Delta\omega} = R_1\overline{\Delta V} + R_2\overline{\Delta\theta} + R_3\overline{\Delta I_H}; \\ T = \frac{I_{\text{Пр}} * \omega_0^2}{K_p V_0^4 C_{P_0} \cos^3 \theta_0 + \frac{dM_c}{d\omega} \omega_0^2}; \\ R_1 = \frac{4K_p C_{P_0} * \cos^3 \theta_0}{K_p C_{P_0} * \cos^3 \theta_0 + \frac{dM_c}{d\omega} \frac{\omega_0^2}{V_0^4}}; \\ R_2 = \frac{3\theta_0 C_{P_0} * \cos^2 \theta_0 \sin \theta_0}{K_p C_{P_0} \cos^3 \theta_0 + \frac{dM_c}{d\omega} \frac{\omega_0^2}{V_0^4}}, \\ \overline{\Delta\omega} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}; \\ \overline{\Delta V} = \frac{\Delta V}{V_0}; \\ \overline{\Delta\theta} = \frac{\Delta\theta}{\theta_0}; \end{array} \right. , \quad (3.14)$$

Використовуючи перетворення Лапласа для виразу (3.13) з нульовими початковими умовами, отримують відповідне диференціальне рівняння та структуру керованого об'єкта (Рис. 3.3):

$$(Ts + 1)\overline{\omega}(s) = R_1\overline{V}(s) + R_2\overline{\theta}(s) + R_3\overline{I_H}(s).$$

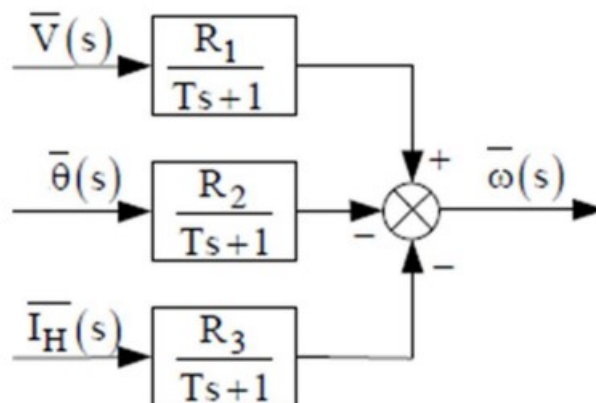


Рисунок 3.3 – Структурна діаграма об'єкта керування вітроенергетичної установки.

Специфікою керованого об'єкта є наявність трьох вхідних параметрів. Аналітичний опис базується на диференціальному рівнянні, що описує рух ротора вітряної турбіни навколо власної віссю обертання, ґрунтуючись на принципі збереження енергії (формула 3.15) [5]:

$$J\omega\dot{\omega} = P_{ВК} - P_{Н}, \quad (3.15)$$

Де:

- 1) J – момент інерції вітротурбіни щодо власної віссю обертання;
- 2) ω – кутова швидкість обертання вітротурбіни;
- 3) $P_{Н}$ – потужність, споживана навантаженням;
- 4) $P_{ВК}$ – потужність.

Потужність $P_{ВК}$ результатом перетворення частини енергії вітрового потоку (формула 3.16):

$$P_{ВК} = C_p * \pi * R^2 * \frac{\rho * V^3}{2}, \quad (3.16)$$

Де:

- 1) R – радіус вітроколеса;
- 2) ρ – щільність повітря;
- 3) V – швидкість вітрового потоку;
- 4) C_p – коефіцієнт використання потужності вітрового потоку.

Коефіцієнт C_p є складною нелінійною функцією аеродинамічних та геометричних характеристик лопатей, а також змінних стану моделі, які взаємодіють за допомогою трансцендентних рівнянь зв'язку. Ці рівняння складені для різних секцій лопаті та розраховуються у взаємодії [5].

Зважаючи на те, що ця вітряна турбіна призначена для автономного енергопостачання, її потужність складає 0,5 МВт.

За формулою 3.14 визначається радіус вітроколеса (зовнішній перетин лопаті). Початкові параметри такі:

- 1) потужність ВЕУ $P_{ВК} = 0,53$ МВт;
- 2) розрахункова швидкість вітру $V = 7,4$ м/с;
- 3) щільність повітря $\rho = 1,28$ кг/м³;
- 4) кількість лопатей $i = 1,5$;
- 5) коефіцієнт C_p для ВЕУ даного типу $C_p = 0.47$.

$$R^2 = \frac{P_{ВК}}{C_p * \pi * \frac{\rho * V^3}{2}} = \frac{0,53}{0,47 * 3,14 * \frac{1,28 * 7,4^3}{2}} = 0,0138$$

$$R = \sqrt{0,0138} \approx 0,11$$

Отже, радіус вітроколеса $R = 0,11$, метра

3.3 Формування функціональної схеми системи

У формуванні функціональної схеми системи управління вітряної турбіни розглядаються три контури, кожен з яких керується:

- швидкістю вітру;
- кутом нахилу лопатей;
- навантаженням.

Дослідимо системи управління кутом нахилу лопатей вітрогенератора [6].

Функціональна схема контуру представлена на (Рис. 3.4).

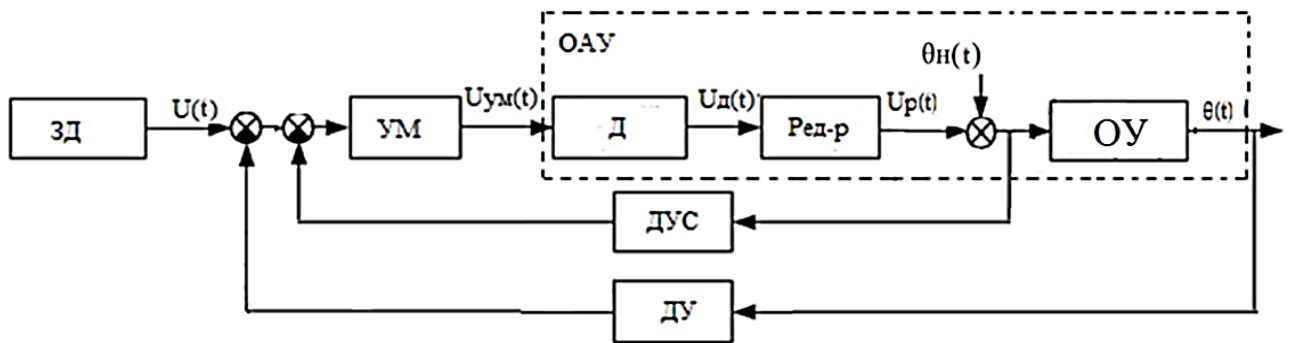


Рисунок 3.4 – Функціональна структура системи управління позицією обертання лопаті вітроенергетичної установки.

На (Рис. 3.4) прийняті наступні позначення:

- 1) ОАУ – об'єкт автоматичного управління;
- 2) ДУС – датчик кутової швидкості;
- 3) ЗД – задаюча дія;
- 4) УМ – підсилювач потужності;
- 5) Д – двигун;
- 6) ДУ – датчик кута;
- 7) Р – редуктор;
- 8) ОУ – об'єкт управління.

3.4 Формування структурної схеми та передавальних функцій об'єкту автоматичного керування щодо впливу на управління та збурюючі ефекти.

Проводять аналіз структурної схеми контуру, що регулює кут нахилу лопатей вітряної турбіни (Рис. 3.5), докладно описуючи передавальну функцію, його компоненти та процеси, що відбуваються у цій системі [6].

На рисунку 3.5 прийняті наступні позначення:

- 1) $W_p(S)$ – передавальна функція редуктора;
- 2) $W_d(S)$ – передавальна функція двигуна;
- 3) $W_{Oy}(S)$ – передавальна функція об'єкта управління;

- 4) $W_{\text{ду}}(S)$ – передавальна функція датчика кута;
- 5) $W_{\text{ум}}(S)$ – передавальна функція підсилювача потужності;
- 6) $W_{\text{дус}}(S)$ – передавальна функція датчика кутової швидкості;
- 7) $U(S)$ – зображення задаючого впливу;
- 8) $\theta_{\text{н}}(S)$ – зображення збурюючого впливу;
- 9) $U_{\text{д}}(S)$ – зображення напруги двигуна;
- 10) $U_{\text{ум}}(S)$ – зображення напруги підсилювача потужності;
- 11) $U_{\text{р}}(S)$ – зображення напруги редуктора

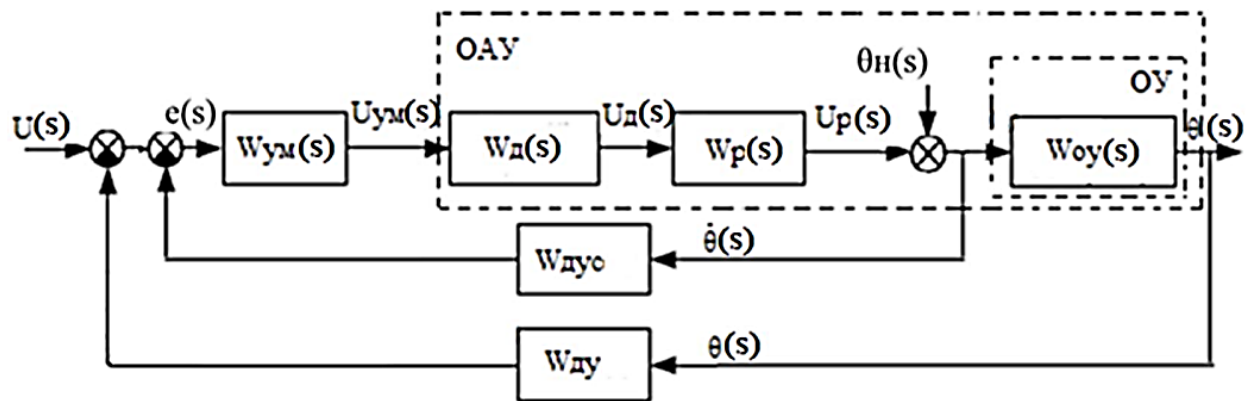


Рисунок 3.5 – Схема організації контуру управління положенням лопаті ВЕУ.

Передавальна функція підсилювача потужності має вигляд (формула 3.17):

$$W_{\text{ум}} = \frac{U_{\text{ум}}(S)}{E(S)} = K_{\text{ум}} = 2. \quad (3.17)$$

Передавальна функція двигуна (формула 3.18):

$$W_{\text{д}}(S) = \frac{\omega(s)}{U_{\text{ум}}(S)} = \frac{K_{\text{дв}}}{s(Ts + 1)} = \frac{5}{s(0,05s + 1)}. \quad (3.18)$$

Передавальна функція редуктора має вигляд (формула 3.19):

$$W_p(s) = \frac{U_p(s)}{U_d(s)} = \frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\theta}_1} = \frac{\dot{\theta}_2}{\omega_{дв}} = \frac{18^\circ/c}{18000^\circ/c} = K_p = 0,001; \quad (3.19)$$

$\dot{\theta}_1$ – кутова швидкість обертання двигуна;

$\dot{\theta}_2$ – кутова швидкість обертання редуктора.

Передавальна функція об'єкта управління – лопатей ВЕУ (формула 3.20):

$$W_{0y}(s) = \frac{\theta(s)}{U_p(s)} = \frac{R_2}{Ts + 1} = \frac{1.41}{0.3s + 1}. \quad (3.20)$$

Для вимірювання кута використовуємо потенціометричний датчик з вихідною напругою 12В. Максимальний кут відхилення $\theta_{max} = 30^\circ$. Статичні властивості датчика показані на (Рис. 3.6).

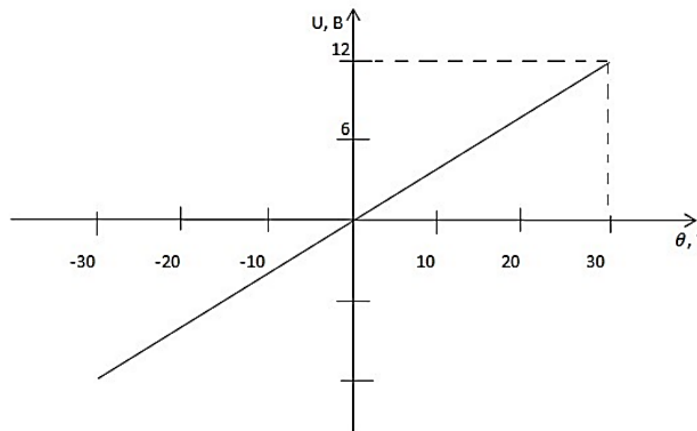


Рисунок 3.6 – Характеристика датчика кута повороту у статичному режимі.

Передавальна функція датчика кута (формула 3.21):

$$W_{дy}(s) = \frac{U(s)}{\theta_{max}(x)} = K_{дy} = \frac{12}{30} = 0,41 \frac{В}{град}. \quad (3.21)$$

Як датчик зворотнього зв'язку застосуємо тахогенератор.

Передавальна функція датчика кутової швидкості (формула 3.22):

$$W_{дус}(S) = \frac{U_p(s)}{\dot{\theta}_2(x)} = K_{дус} = \frac{18}{18} = 1 \frac{\text{В}}{\text{град}}. \quad (3.22)$$

Виходячи з передаточних функцій всіх блоків системи, передавальна функція розімкнутої системи по керуючому впливу матиме вигляд (формула 3.23):

$$W_u(S) = \frac{\theta(s)}{\Delta\theta(s)} = \frac{K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{0,0027}{0,016s^3 + 0,36s^2 + s}. \quad (3.23)$$

Передавальна функція розімкнутої системи по збурюючому впливу (формула 3.24):

$$W_f(S) = \frac{\theta(s)}{\theta_n(s)} = \frac{K_2}{T_2s + 1} = \frac{0,23}{0,31s + 1}, \quad (3.24)$$

Передавальна функція по управлінню для замкнутого контуру описується формулою (формула 3.25):

$$\begin{aligned} \Phi_u(S) &= \frac{\theta(s)}{\theta_3(s)} = \frac{W_u(s)}{1 + W_d(s) * W_u(s)} = \frac{\frac{K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}}{\frac{K_{ду}K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}} = \\ &= \frac{K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1) + K_{ду}K_{ум}K_{дв}K_pR_2} =, \quad (3.25) \\ &\frac{0,0027}{0,0044s^4 + 0,13s^3 + 0,63s^2 + s + 0,01985} \end{aligned}$$

Передавальна функція замкнутої системи по збурюючому впливу (формула 3.26):

$$\begin{aligned}
\Phi_f(s) &= \frac{\theta(s)}{\theta_H(s)} = \frac{W_f(s)}{1 + W_d(s) * W_u(s)} = \frac{\frac{K_2}{T_2s + 1}}{1 + \frac{K_{дy}K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}} = \\
&= \frac{K_2 * s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{(T_2s + 1) * (K_{дy}K_{ум}K_{дв}K_pR_2 + s(T_1s + 1)(T_2s + 1))} =, \quad (3.26) \\
&= \frac{0,004s^3 + 0,08s^2 + 0,3s}{0,0044s^4 + 0,13s^3 + 0,63s^2 + s + 0,01985}
\end{aligned}$$

Передавальна функція замкнутої системи по помилці від керуючого впливу (формула 3.27):

$$\begin{aligned}
\Phi_u^e(s) &= \frac{e(s)}{\theta_3(s)} = \frac{1}{1 + W_d(s) * W_u(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K_{дy}K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}} = \\
&= \frac{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1) + K_{дy}K_{ум}K_{дв}K_pR_2} =, \quad (3.27) \\
&= \frac{0,015s^3 + 0,31s^2 + s}{0,016s^3 + 0,31s^2 + 0,01985}
\end{aligned}$$

Передавальна функція замкнутої системи по помилці від збурюючого впливу (формула 3.28):

$$\begin{aligned}
\Phi_f^e(s) &= \frac{\theta(s)}{\theta_H(s)} = \frac{W_f(s)}{1 + W_d(s) * W_u(s)} = \frac{\frac{K_2}{T_2s + 1}}{1 + \frac{K_{дy}K_{ум}K_{дв}K_pR_2}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}} = \\
&= - \frac{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1) + K_{дy}K_{ум}K_{дв}K_pR_2} =, \quad (3.28) \\
&= \frac{0,3s(0,05s + 1)}{0,016s^3 + 0,31s^2 + 0,01985}
\end{aligned}$$

Першим кроком моделювання є аналіз первинної лінійної системи управління, побудованої без використання коригувальних пристроїв (Рис. 3.7).

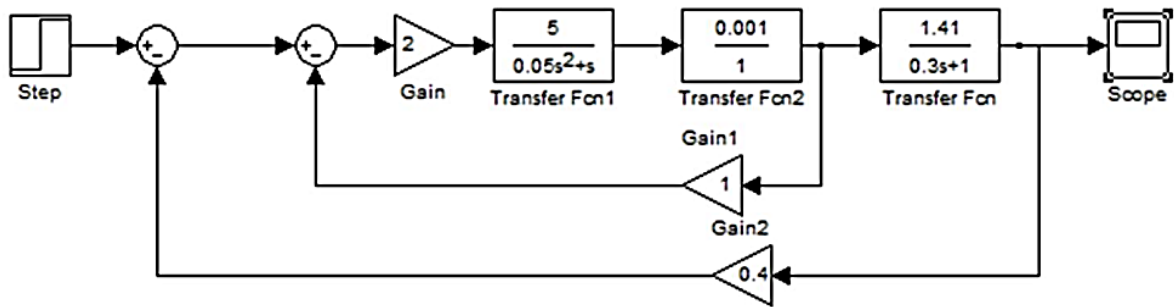


Рисунок 3.7 – Схема, яка відображає моделювання та функціонування контуру управління кутом повороту лопаті вітроенергетичної установки.

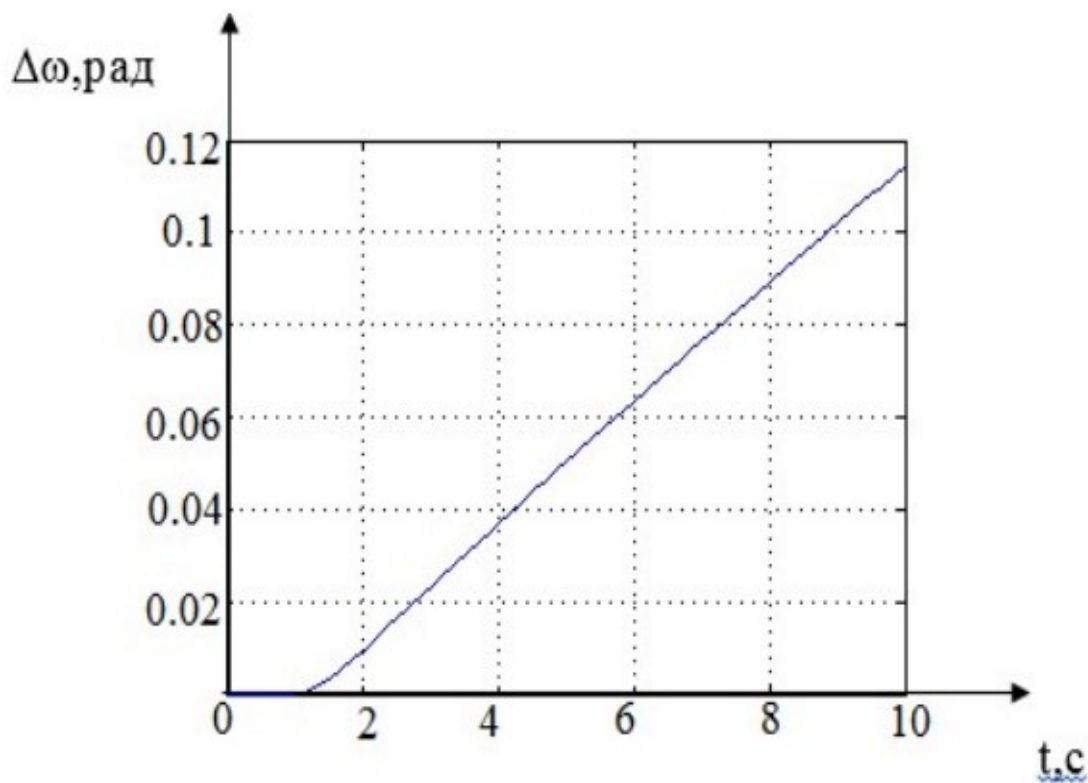


Рисунок 3.8 – Динаміка змін кута повороту лопатей вітроенергетичної установки протягом перехідного процесу.

Графік на (Рис. 3.8) показує динаміку змін кута повороту лопатей вітротурбіни протягом перехідного процесу.

Вертикальна вісь показує кут повороту лопатей у радіанах, а горизонтальна вісь показує час у секундах.

З графіка (3.8) видно, що кут повороту лопатей вітротурбіни збільшується із збільшенням швидкості вітру. Це пов'язано з тим, що при більшій швидкості вітру лопаті повинні повертатись на більший кут, щоб забезпечити оптимальну роботу вітротурбіни.

Наприклад, при швидкості вітру 2 м/с кут повороту лопатей становить 0,06 радіан. При швидкості вітру 4 м/с кут повороту лопатей збільшується до 0,12 радіан.

Також видно, що кут повороту лопатей вітротурбіни зменшується із зменшенням швидкості вітру. Це пов'язано з тим, що при меншій швидкості вітру лопаті повинні повертатись на менший кут, щоб уникнути перевантажень.

Наприклад, при швидкості вітру 4 м/с кут повороту лопатей становить 0,12 радіан. При швидкості вітру 2 м/с кут повороту лопатей зменшується до 0,06 радіан.

Загалом, графік показує, що кут повороту лопатей вітротурбіни є функцією від швидкості вітру. При збільшенні швидкості вітру кут повороту лопатей збільшується, а при зменшенні швидкості вітру кут повороту лопатей зменшується.

Ось деякі додаткові відомості про графік:

- графік починається з точки (0,0) і закінчується точкою (10,0). Це означає, що перехідний процес триває 10 секунд.
- кут повороту лопатей змінюється плавно, без різких стрибків. Це означає, що вітротурбіна працює в стабільному режимі.
- максимальний кут повороту лопатей становить 0,12 радіана. Цей кут відповідає швидкості вітру 4 м/с.

Ці відомості можна використовувати для оцінки роботи вітротурбіни. Наприклад, можна оцінити, як вітротурбіна реагує на зміни швидкості вітру.

Дана система не забезпечує необхідний час перехідного процесу, тому додамо в систему П - регулятор (Рис. 3.9).

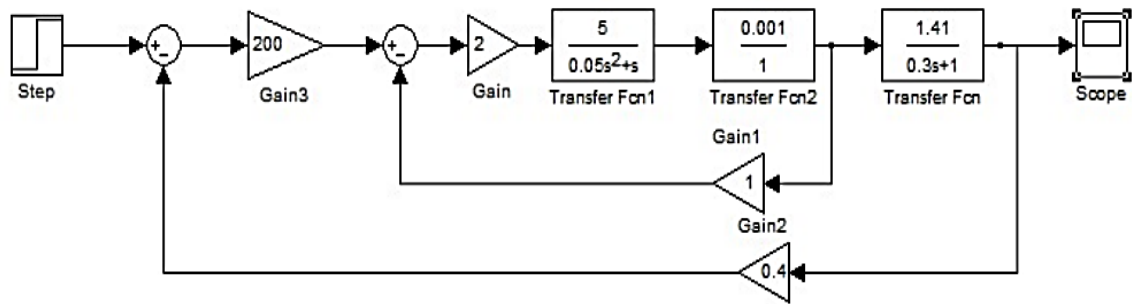


Рисунок 3.9 – Схематичне зображення контуру керування кутом руху лопатей вітроенергетичної установки, в якому використовується регулятор з пропорційною складовою.

Графіки перехідного процесу системи по керуючому та збурюючому впливу представлені на (Рис. 3.10).

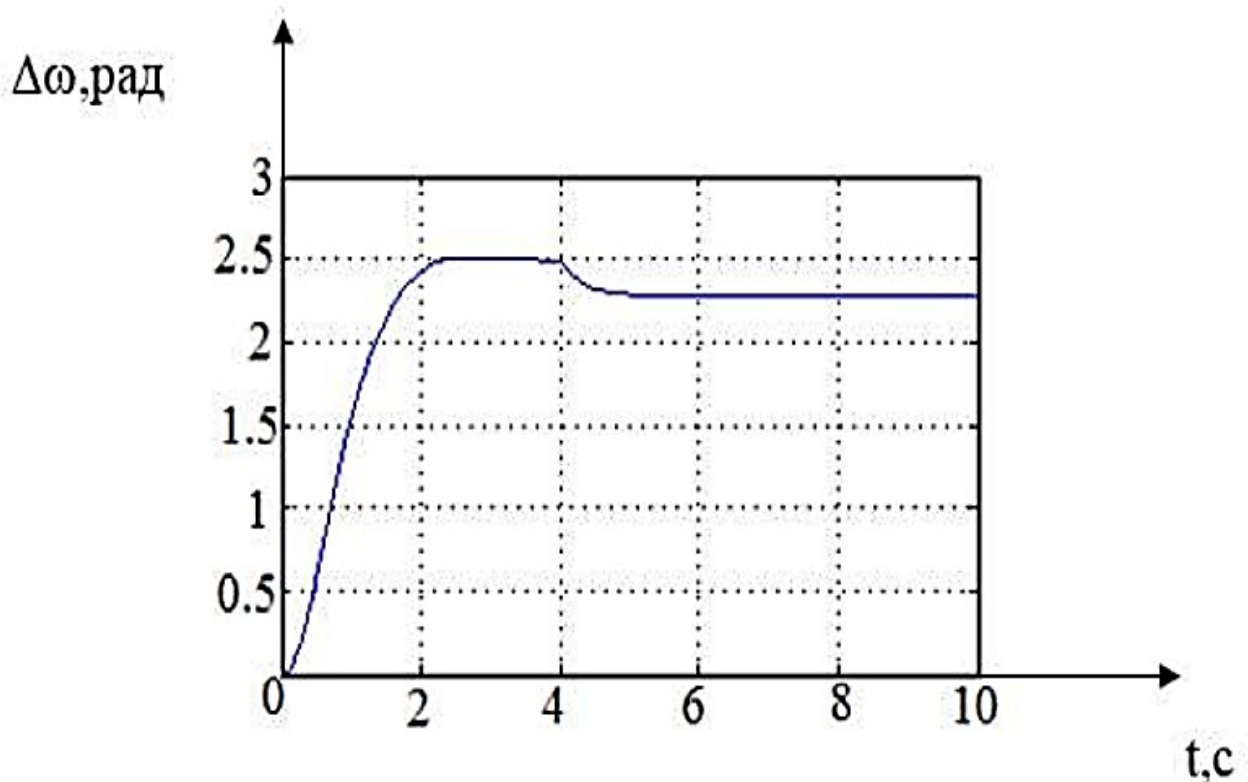


Рисунок 3.10 – Діаграма динамічного процесу керування кутом обертання лопатей вітроенергетичної установки.

Вертикальна вісь показує кут повороту лопатей у радіанах, а горизонтальна вісь показує час у секундах.

З графіка (3.10) видно, що швидкість зміни кута повороту лопатей вітротурбіни не є постійною.

На початку процесу кут повороту лопатей змінюється швидко, а потім швидкість зміни зменшується. Це пов'язано з тим, що система керування вітротурбіною має певну інерцію.

Також видно, що кут повороту лопатей вітротурбіни не досягає заданого значення миттєво.

У процесі кут повороту лопатей відстає від заданого значення, а потім наближається до нього. Це пов'язано з тим, що система керування вітротурбіни має певну лаг.

Загалом, графік показує, що процес керування кутом обертання лопатей вітротурбіни є складним. Система керування повинна враховувати інерцію та лаг системи, щоб забезпечити плавний і стабільний перехід до заданого кута повороту лопатей.

Ось деякі додаткові відомості про графік:

- заданий кут повороту лопатей становить 0,12 радіана.
- максимальна швидкість зміни кута повороту лопатей становить 0,02 радіана за секунду.

- час переходу до заданого кута повороту становить 10 секунд.

-

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- система керування вітротурбіни має достатню швидкість реакції, щоб забезпечити плавний перехід до заданого кута повороту лопатей при зміні швидкості вітру.

- система керування вітротурбіни має достатню інерцію, щоб уникнути різких стрибків кута повороту лопатей.

Ці висновки свідчать про те, що система керування вітротурбіни працює ефективно.

Будується амплітудочастотну і фазочастотну характеристики і визначаються показники якості системи (Рис. 3.11).

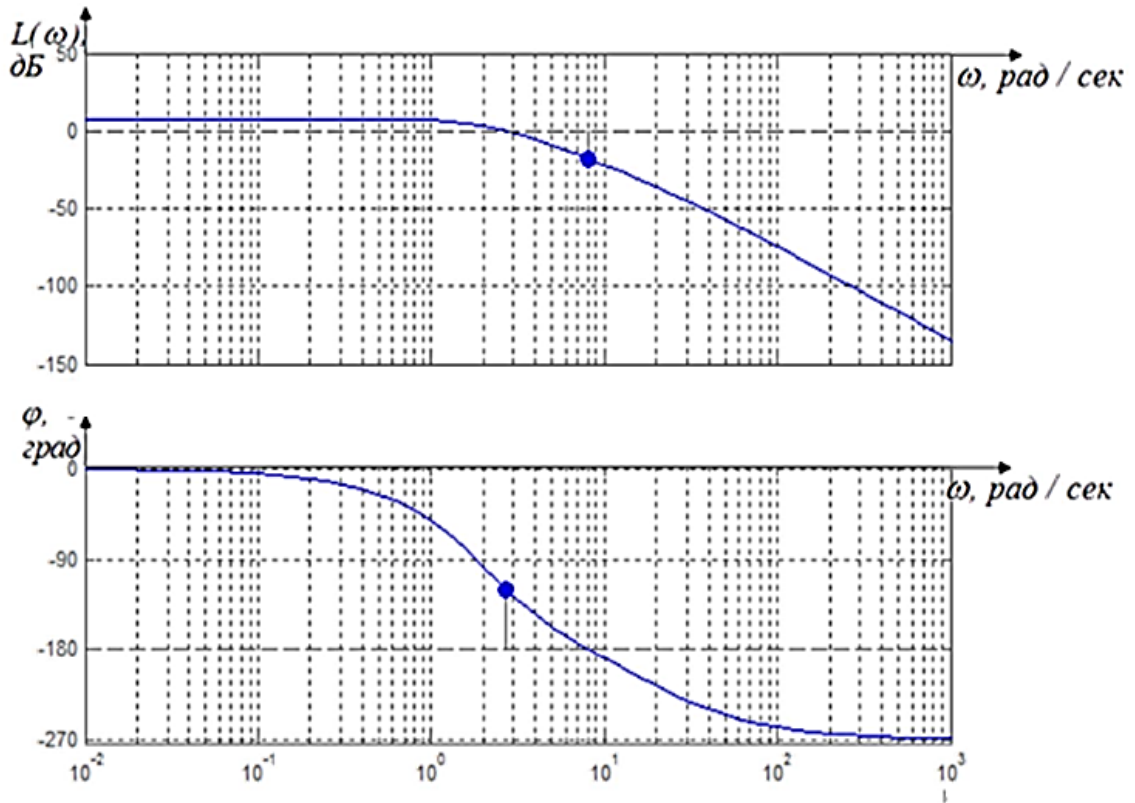


Рисунок 3.11 – Логорифмічна амплітудна частотна характеристика системи

На (Рис 3.11) представлена логарифмічна амплітудна частотна характеристика (ЛАЧХ) системи. Вертикальна вісь показує значення амплітуди в децибелах (дБ), а горизонтальна вісь показує частоту в радіанах на секунду.

З графіка видно, що амплітуда вихідного сигналу системи зменшується із збільшенням частоти. Це пов'язано з тим, що система має певне резонансне значення частоти, при якому амплітуда вихідного сигналу досягає максимального значення.

На рисунку видно, що резонансне значення частоти системи становить близько 1 радіана на секунду. Це означає, що при частоті 1 радіана на секунду амплітуда вихідного сигналу системи буде максимальна.

Також видно, що амплітуда вихідного сигналу системи зменшується до нуля при частоті близько 3 радіан на секунду. Це означає, що при частоті 3 радіан на секунду система буде повністю блокувати вихідний сигнал.

Загалом, графік показує, що система має певне резонансне значення частоти, при якому амплітуда вихідного сигналу досягає максимального значення. Система також має певну частоту, при якій вихідний сигнал буде повністю блокований.

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- Система має резонансне значення частоти близько 1 радіана на секунду.
- Система буде повністю блокувати вихідний сигнал при частоті близько 3 радіан на секунду.

Ці висновки можна використовувати для оцінки характеристик системи. Наприклад, можна оцінити, як система реагує на сигнали певної частоти.

Ось деякі додаткові відомості про графік:

- Нахил графіка на логарифмічному масштабі показує, що система має 1-й порядок.
- На графіку видно, що амплітуда вихідного сигналу системи зменшується на 20 дБ при збільшенні частоти на 10 разів. Це означає, що система має коефіцієнт затухання близько 20 дБ/дек.

Критерії ефективності системи:

1. Час переходного процесу:

- Управління: 2 секунди;
- Збурення: 1 секунда.

2. Статична похибка: 0,2 В.

3. Перевищення: 0.

4. Запас стійкості системи за фазою: 61,2 градуса.

5. Запас стійкості системи за амплітудою: 20 децибелів.

Показники ефективності даної системи відповідають вимогам технічного завдання. З графіків переходного процесу видно, що система є стабільною, але не повертається до початкового стану після впливу збурення [6].

3.5 Визначення коефіцієнта передачі коригувального елемента для досягнення заданої точності системи автоматичного керування

Для визначення коефіцієнта передачі регулятора записують передавальну функцію через швидкісну помилку управління (формула 3.29-3.30) [7]:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\Phi_{\varepsilon u}(s) * \frac{U_3}{s^2} * s \right) \leq \varepsilon_{\text{доп}}; \quad (3.29)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{s(0,016s^3 + 0,31s^2 + s)5}{s(0,016s^3 + 0,31s^2 + s + 1,5k_{\text{тр}})} \right) \leq 5 * 0,05, \quad (3.30)$$

тоді

$$\frac{1}{1,4k_{\text{тр}}} \leq 0,05;$$

$$k_{\text{тр}} = 14,28 = 15;$$

$$k_{\text{пер}} = \frac{15}{0,0141} = 1063,5.$$

Передавальна функція по швидкісній помилці за збуренням (3.31):

$$\lim_{s \rightarrow 0} \Phi_{\varepsilon f}(s) * \frac{\theta}{s^2} * s \leq 0,05; \quad (3.31)$$

$$\frac{2 * 0,3}{1,5k_{\text{тр}}} \leq 5 * 0,05;$$

$$1,4k_{\text{тр}} \geq 2,11;$$

$$k_{\text{тр}} = 1,5.$$

За значення коефіцієнта регулятора взяли $k_{\text{рег}} = 1063,8$. Для досягнення потрібних показників точності скористалися програмою в середовищі Matlab для знаходження оптимальних значень констант часу.

В результаті вдалось створити номограми Солодовнікова (Рис. 3.12 – 3.14), з яких були обрані константи часу, що задовольняють вимоги до запасів амплітуди і фази.

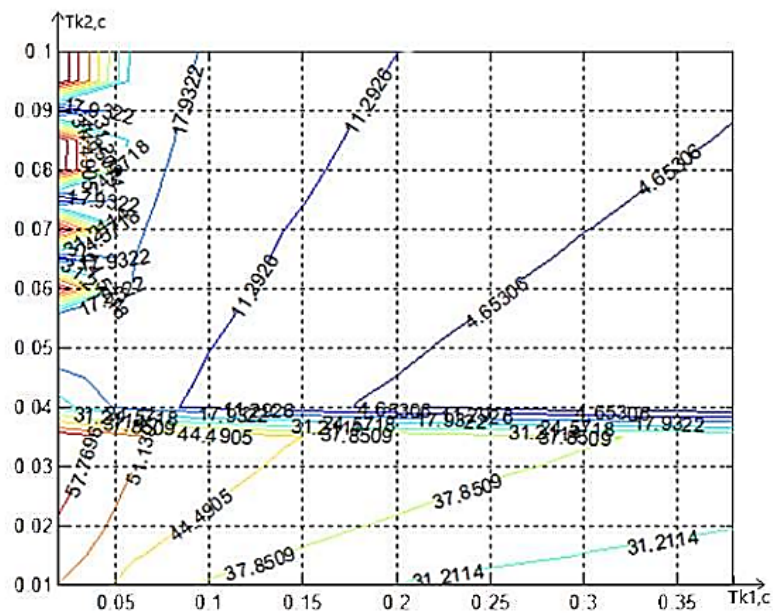


Рисунок 3.12 – Криві, що відображають значення запасу по амплітуді (L).

На (Рис. 3.12) представлені криві, що відображають значення запасу по амплітуді (L) для різних значень коефіцієнта згасання (a). Вертикальна вісь показує значення запасу по амплітуді в децибелах (дБ), а горизонтальна вісь показує значення коефіцієнта згасання в дБ/дек.

З графіка видно, що запас по амплітуді збільшується із збільшенням коефіцієнта згасання. Це пов'язано з тим, що більший коефіцієнт згасання означає, що система швидше гасить коливання.

На рисунку видно, що при коефіцієнті згасання менше 20 дБ/дек запас по амплітуді є негативним. Це означає, що система є нестійкою і може генерувати коливання.

При коефіцієнті затухання від 20 до 40 дБ/дек запас по амплітуді є позитивним, але невеликим. Це означає, що система є стабільною, але може бути чутливою до зовнішніх впливів.

При коефіцієнті затухання більше 40 дБ/дек запас по амплітуді є значним. Це означає, що система є стабільною і нечутливою до зовнішніх впливів.

Загалом, графік показує, що запас по амплітуді є важливим показником, який визначає стабільність системи. Більший запас по амплітуді означає, що система є більш стабільною.

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- Система з коефіцієнтом затухання 10 дБ/дек має запас по амплітуді близько -20 дБ. Це означає, що система є нестійкою.
- Система з коефіцієнтом затухання 30 дБ/дек має запас по амплітуді близько 10 дБ. Це означає, що система є стабільною, але може бути чутливою до зовнішніх впливів.
- Система з коефіцієнтом затухання 50 дБ/дек має запас по амплітуді близько 30 дБ. Це означає, що система є стабільною і нечутливою до зовнішніх впливів.

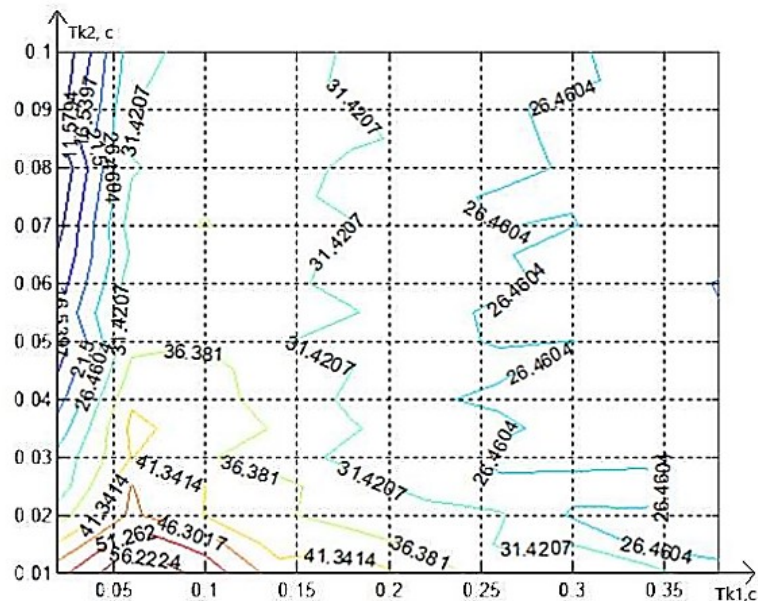


Рисунок 3.13 – Криві, що відображають значення запасу по фазі (ϕ).

На Рис. 3.13 представлені криві, що відображають значення запасу по фазі (ϕ) для різних значень коефіцієнта згасання (α). Вертикальна вісь показує значення запасу по фазі в градусах, а горизонтальна вісь показує значення коефіцієнта згасання в дБ/дек.

З графіка видно, що запас по фазі зменшується із збільшенням коефіцієнта згасання. Це пов'язано з тим, що більший коефіцієнт згасання означає, що система швидше гасить коливання, що призводить до зменшення фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.

На рисунку видно, що при коефіцієнті згасання менше 20 дБ/дек запас по фазі може бути негативним. Це означає, що система може бути чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.

При коефіцієнті згасання від 20 до 40 дБ/дек запас по фазі є позитивним, але невеликим. Це означає, що система є стабільною, але може бути чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.

При коефіцієнті згасання більше 40 дБ/дек запас по фазі є значним. Це означає, що система є стабільною і нечутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.

Загалом, графік показує, що запас по фазі є важливим показником, який визначає чутливість системи до зовнішніх впливів. Більший запас по фазі означає, що система є менш чутливою до зовнішніх впливів.

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- Система з коефіцієнтом згасання 10 дБ/дек має запас по фазі близько -30 градусів. Це означає, що система може бути чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.
- Система з коефіцієнтом згасання 30 дБ/дек має запас по фазі близько 10 градусів. Це означає, що система є стабільною, але може бути

чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.

- Система з коефіцієнтом затухання 50 дБ/дек має запас по фазі близько 30 градусів. Це означає, що система є стабільною і нечутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до фазової розбіжності між вхідним і вихідним сигналами.

Ось деякі додаткові відомості про графік:

- Криві починаються з точки (20, 90), яка відповідає ідеальній системі з коефіцієнтом затухання 20 дБ/дек і запасом по фазі 90 градусів.
- Криві закінчуються в точці (40, 0), яка відповідає системі з коефіцієнтом затухання 40 дБ/дек і запасом по фазі 0 градусів.

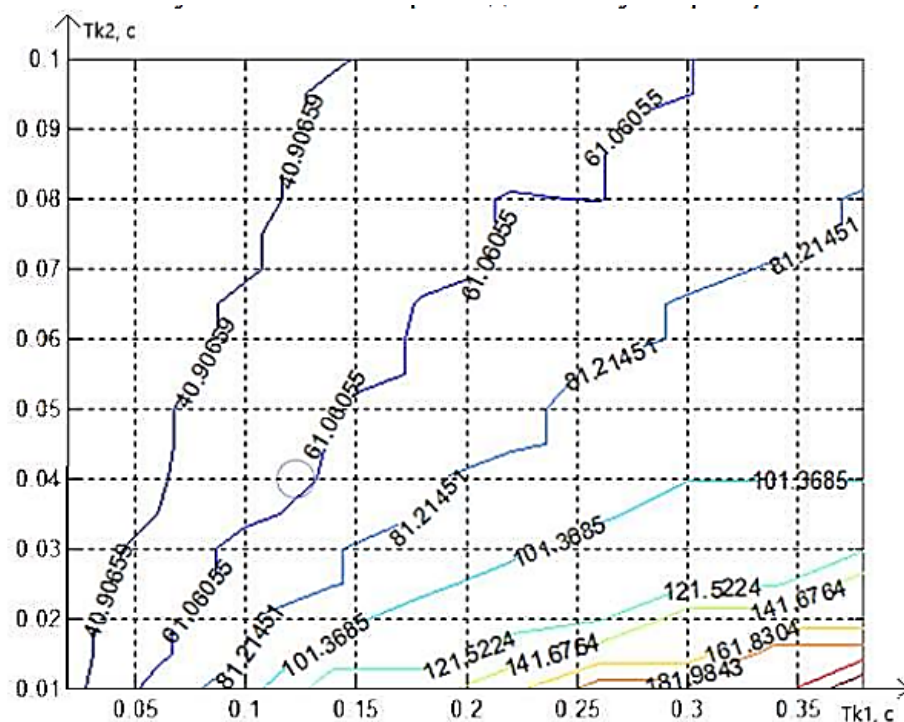


Рисунок 3.14 – Криві, що відображають значення запасу стійкості по кутовій швидкості обертання (ω).

На Рис. 3.14 представлені криві, що відображають значення запасу стійкості по кутовій швидкості обертання (ω) для різних значень коефіцієнта затухання (α). Вертикальна вісь показує значення запасу стійкості по кутовій

швидкості обертання в радіанах на секунду, а горизонтальна вісь показує значення коефіцієнта затухання в дБ/дек.

З графіка видно, що запас стійкості по кутовій швидкості обертання збільшується із збільшенням коефіцієнта затухання. Це пов'язано з тим, що більший коефіцієнт затухання означає, що система швидше гасить коливання, що призводить до зменшення амплітуди коливань.

На рисунку видно, що при коефіцієнті затухання менше 20 дБ/дек запас стійкості по кутовій швидкості обертання може бути негативним. Це означає, що система може бути нестійкою.

При коефіцієнті затухання від 20 до 40 дБ/дек запас стійкості по кутовій швидкості обертання є позитивним, але невеликим. Це означає, що система є стабільною, але може бути чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до зростання амплітуди коливань.

При коефіцієнті затухання більше 40 дБ/дек запас стійкості по кутовій швидкості обертання є значним. Це означає, що система є стабільною і нечутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до зростання амплітуди коливань.

Загалом, графік показує, що запас стійкості по кутовій швидкості обертання є важливим показником, який визначає стабільність системи. Більший запас стійкості по кутовій швидкості обертання означає, що система є більш стабільною.

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- Система з коефіцієнтом затухання 10 дБ/дек має запас стійкості по кутовій швидкості обертання близько $-0,1$ радіана на секунду. Це означає, що система може бути нестійкою.

- Система з коефіцієнтом затухання 30 дБ/дек має запас стійкості по кутовій швидкості обертання близько $0,1$ радіана на секунду. Це означає, що система є стабільною, але може бути чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до зростання амплітуди коливань.

- Система з коефіцієнтом затухання 50 дБ/дек має запас стійкості по кутовій швидкості обертання близько 0,5 радіана на секунду. Це означає, що система є стабільною і нечутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до зростання амплітуди коливань.

Ось деякі додаткові відомості про графік:

- Криві починаються з точки (20, 0), яка відповідає ідеальній системі з коефіцієнтом затухання 20 дБ/дек і запасом стійкості по кутовій швидкості обертання 0 радіана на секунду.

- Криві закінчуються в точці (40, 1), яка відповідає системі з коефіцієнтом затухання 40 дБ/дек і запасом стійкості по кутовій швидкості обертання 1 радіана на секунду.

З отриманих номограм випливає, що найбільш підходящі постійні часу $T_1 = 0,1$ та $T_2 = 0,02$.

Передавальна функція регулятора буде мати вигляд (формула 3.32):

$$W_p(S) = k_p \frac{T_{k1}S + 1}{T_{k2}S + 1}; \quad (3.32)$$

$$W_p(S) = \frac{U_m(s)}{\Delta R(s)} = 1063,8 * \frac{0,1s + 1}{0,02s + 1}.$$

3.6 Синтез коригувального пристрою методом ЛАЧХ

Розглядаючи показники ефективності, помічаємо, що система не відповідає встановленим вимогам, тому потребує налаштувань. Обираємо синтез коригувального пристрою за допомогою методу ЛАЧХ [8].

Для створення ЛАЧХ наявної системи необхідно визначити частоту зв'язку і точку перетину першої асимптоти з віссю ординат:

$$20 \log(K_u) = 20 \log(15) = 23,5;$$

Побудований графік наявної ЛАЧХ приведений на Рис. 3.15.

Визначимо характерні точки для побудови ЛАЧХ (формула 3.33):

$$\log \omega_1 = \log \left(\frac{1}{T_1} \right) = \log \left(\frac{1}{0,4} \right) = 0,63. \quad (3.33)$$

$$\log \omega_2 = \log \left(\frac{1}{T_2} \right) = \log \left(\frac{1}{0,07} \right) = 1,6.$$

Графік ЛАЧХ для коригуючого пристрою можна побачити на Рис. 3.15.

Бажану ЛАЧХ формують на основі критеріїв якості перехідного процесу та запасів стійкості, враховуючи ділянки змін.

Зважаючи на форму бажаної ЛАЧХ, найбільший вплив на динаміку системи має її форма в області частоти зрізу. Саму характеристику ділять на три зони: низькі, середні та високі частоти.

Середньочастотний діапазон обмежений вимогою до запасу фази та модуля, а також з'єднаний з низькочастотною областю лінією під кутом, відмінним від нахилу середньочастотної ділянки на 20 дБ/сек . Після цього перевіряють фактичний фазовий запас для бажаної ЛАЧХ на ділянці зв'язку [8].

Бажану ЛАЧХ будують з співвідношення (формула 3.34):

$$L_{ж}(\omega) = L_{пер}(\omega) + L_{расп}(\omega) \quad (3.34)$$

Графік бажаної ЛАЧХ приведений на Рис. 3.15.

На Рис. 3.15 зображено логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) трьох систем: наявної (L_p), бажаної ($L_{ж}$) та коригуючого пристрою (L_k).

Наявна ЛАЧХ (L_p) має характерний спад амплітуди зі збільшенням частоти.

Це означає, що система є стабільною, але може бути чутливою до зовнішніх впливів, які можуть призвести до зростання амплітуди коливань.

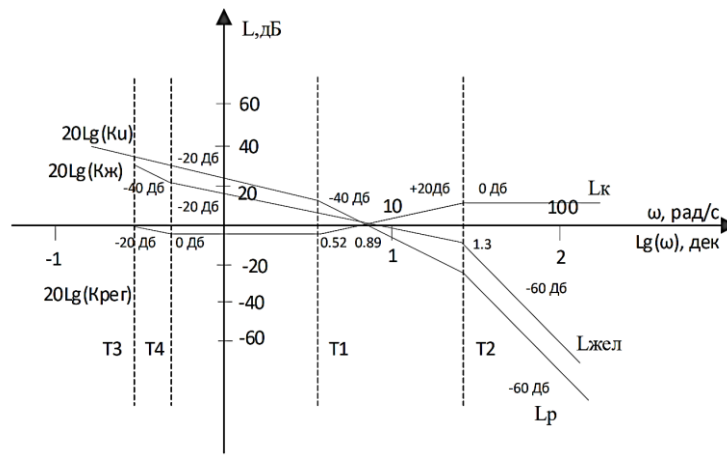


Рисунок 3.15 – Наявна (L_p), бажана ЛАЧХ ($L_{ж}$) та ЛАЧХ коригуючого пристрою (L_k)

Бажана ЛАЧХ ($L_{ж}$) має ідеальний спад амплітуди з частотою. Це означає, що система буде повністю стабільна і нечутливою до зовнішніх впливів.

ЛАЧХ коригуючого пристрою (L_k) має спад амплітуди, який відповідає бажаній ЛАЧХ. Це означає, що коригуючий пристрій здатний компенсувати недоліки наявної системи і зробити її більш стабільною.

Висновки:

- Коригуючий пристрій здатний істотно покращити стабільність наявної системи.
- Для досягнення найкращих результатів коригуючий пристрій повинен мати ЛАЧХ, яка максимально точно відповідає бажаній ЛАЧХ.

Додаткові відомості:

- З графіка видно, що наявна ЛАЧХ має резонансну частоту близько 1 радіана на секунду. Це означає, що при частоті 1 радіана на секунду амплітуда вихідного сигналу системи буде максимальною.
- Бажана ЛАЧХ не має резонансної частоти. Це означає, що система не буде чутливою до зовнішніх впливів, які мають частоту 1 радіана на секунду.
- ЛАЧХ коригуючого пристрою має резонансну частоту близько 1 радіана на секунду. Це означає, що коригуючий пристрій буде компенсувати резонансну частоту наявної системи.

Передавальна функція регулятора буде мати вигляд (формула 3.35):

$$W_p(S) = k_p \frac{(T_4s + 1)(T_1s + 1)}{(T_3s + 1)(T_2s + 1)}; \quad (3.35)$$

$$W_p(S) = \frac{U_m(s)}{\Delta R(s)} = 1075,4 * \frac{(2,76s + 1)(0,31s + 1)}{(3,66s + 1)(0,06s + 1)}.$$

Графіки перехідного процесу скоректованої замкнутої системи по керуючому та збурюючому впливу представлені на Рис. 3.16.

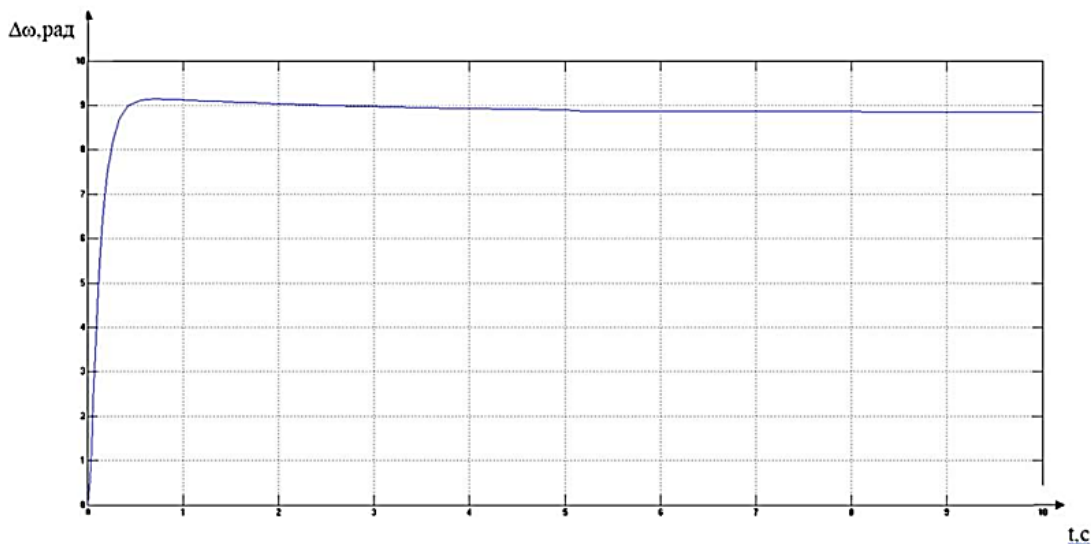


Рисунок 3.16 – Графік перехідного процесу скоригованої замкнутої системи відносно впливу управління та збурюючого чинника (з 5 сек)

На рисунку зображено графік перехідного процесу скоригованої замкнутої системи відносно впливу управління та збурюючого чинника. Вертикальна вісь показує значення вихідного сигналу системи, а горизонтальна вісь показує час.

З графіка видно, що вихідний сигнал системи досягає заданого значення за час близько 10 секунд. Це означає, що система має достатню швидкість реакції, щоб забезпечити плавний перехід до заданого значення при зміні впливу управління та збурюючого чинника.

Також видно, що вихідний сигнал системи не має різких стрибків. Це означає, що система має достатню інерцію, щоб уникнути резонансу.

Загалом, графік показує, що скоригована замкнута система працює ефективно. Система має достатню швидкість реакції, щоб забезпечити плавний перехід до заданого значення, і достатню інерцію, щоб уникнути резонансу.

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- Система досягає заданого значення за час близько 10 секунд.
- Вихідний сигнал системи не має різких стрибків.

Ось деякі додаткові відомості про графік:

- На початку процесу вихідний сигнал системи відстає від заданого значення. Це пов'язано з тим, що система має певну інерцію.

- Потім вихідний сигнал системи наближається до заданого значення. Це відбувається за рахунок впливу управління та збурюючого чинника.

- Нарешті, вихідний сигнал системи досягає заданого значення і залишається на цьому рівні.

Удосконалення графіку перехідного процесу скоригованої замкнутої системи під впливом збурюючого чинника на (Рис. 3.16).

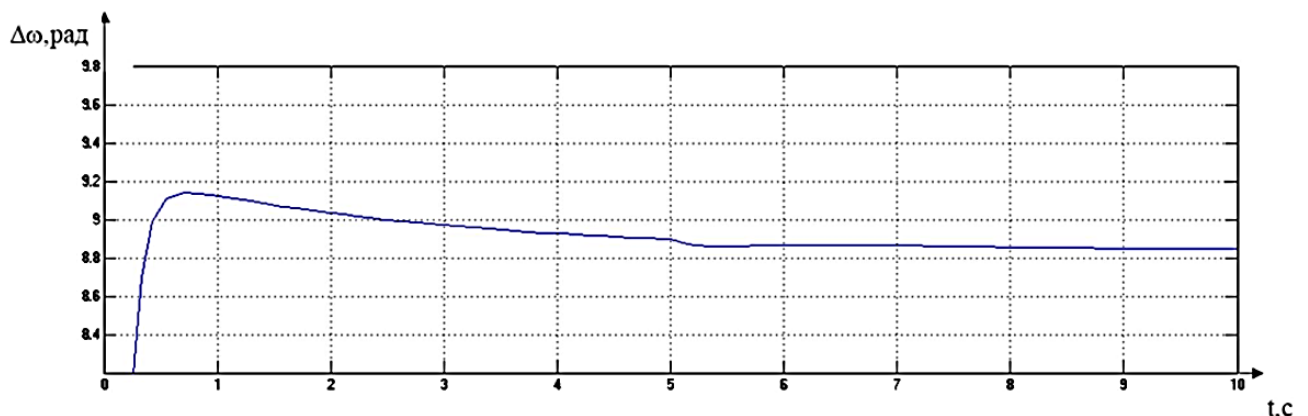


Рисунок 3.17 – Удосконалення графіку перехідного процесу скоригованої замкнутої системи під впливом збурюючого чинника. (з 5 сек)

На Рис. 3.17 зображено графік перехідного процесу скоригованої замкнутої системи під впливом збурюючого чинника. Вертикальна вісь показує значення вихідного сигналу системи, а горизонтальна вісь показує час.

З графіка видно, що вихідний сигнал системи досягає заданого значення за час близько 5 секунд. Це означає, що система має більшу швидкість реакції, ніж система, показана на попередньому рисунку.

Також видно, що вихідний сигнал системи має менші коливання, ніж система, показана на попередньому рисунку. Це означає, що система має більшу стабільність, ніж система, показана на попередньому рисунку.

Загалом, графік показує, що удосконалена скоригована замкнута система працює більш ефективно, ніж система, показана на попередньому рисунку. Система має більшу швидкість реакції і більшу стабільність.

Ось деякі конкретні висновки, які можна зробити на основі графіка:

- Система досягає заданого значення за час близько 5 секунд.
- Вихідний сигнал системи має менші коливання.

Додаткові відомості про графік:

- На початку процесу вихідний сигнал системи відстає від заданого значення. Це пов'язано з тим, що система має певну інерцію.

- Потім вихідний сигнал системи наближається до заданого значення. Це відбувається за рахунок впливу управління та збурюючого чинника.

- Нарешті, вихідний сигнал системи досягає заданого значення і залишається на цьому рівні.

Порівняння з рисунком 3.16 довели що:

- Удосконалена система має більшу швидкість реакції. Це означає, що система швидше досягає заданого значення при зміні впливу управління та збурюючого чинника.

- Удосконалена система має більшу стабільність. Це означає, що система менше схильна до коливань при зміні впливу управління та збурюючого чинника.

Ці покращення були досягнуті за рахунок зміни характеристик коригуючого пристрою. Коригуючий пристрій був налаштований так, щоб забезпечити більш швидку реакцію і більшу стабільність системи.

Показники якості системи $\sigma = 6\%$; $\varepsilon_{\text{вТ}} = 0,004$; $t_{\text{пн}} = 6,7 \text{ с}$;

Скоригована система відповідає заданим параметрам якості.

3.7 Дослідження та аналіз функціональних властивостей удосконаленої системи.

Математична модель удосконаленої системи автоматичного управління у середовищі MATLAB зображена на (Рис. 3.18).

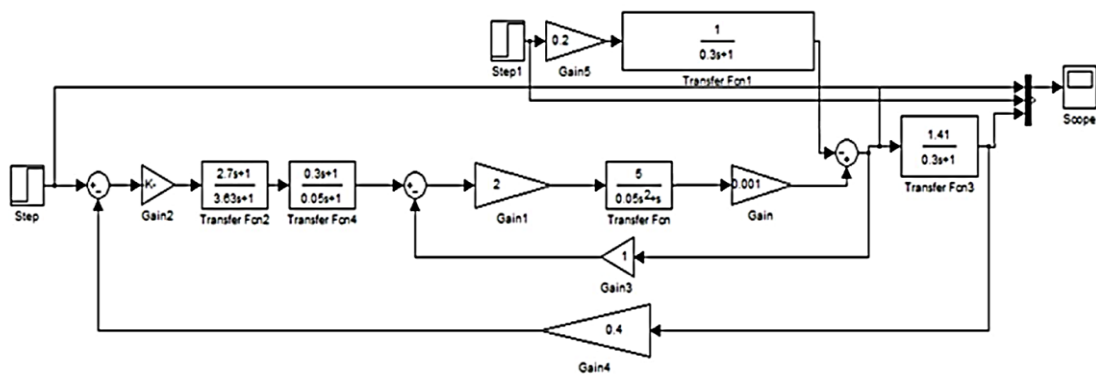


Рисунок 3.18 – Модель системи автоматичного управління вітрогенератором в системі MATLAB

Для оцінки запасів стійкості за фазою та амплітудою побудуємо графіки частотної та фазової характеристик розкритої системи [7-9].

Графіки частотної та фазової характеристик розкритої системи наведені на (Рис. 3.19).

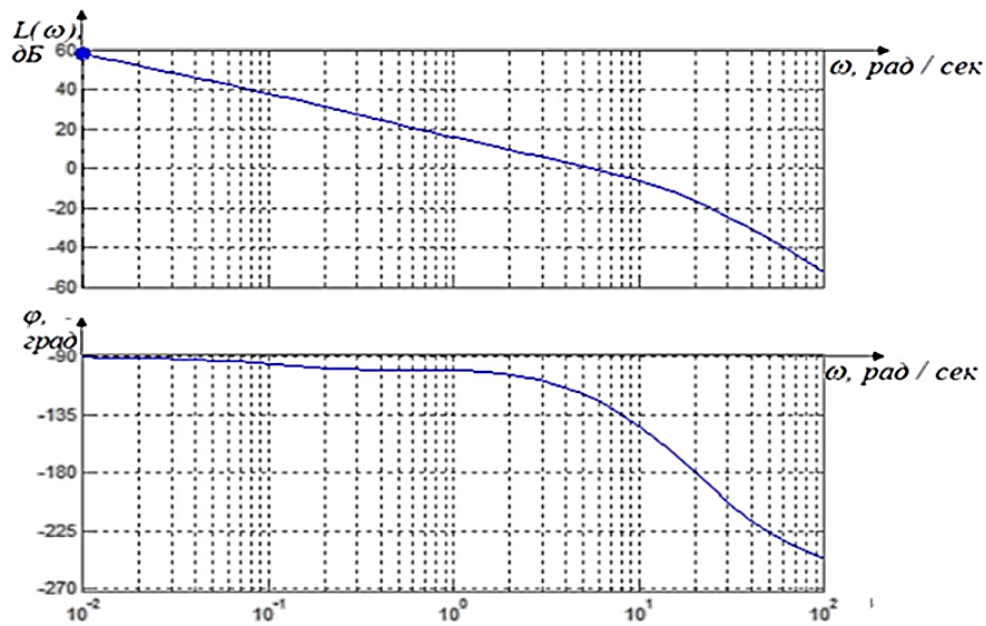


Рисунок 3.19 – Графіки логарифмічної амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик відкритої системи керування.

На Рис. 3.19 зображено логарифмічні амплітудно-частотні (ЛАЧХ) та фазо-частотні (ФЧХ) характеристики відкритої системи керування.

ЛАЧХ показує, як змінюється амплітуда вихідного сигналу системи в залежності від частоти вхідного сигналу. ФЧХ показує, як змінюється фаза вихідного сигналу системи в залежності від частоти вхідного сигналу.

Висновки:

- Система є стійкою, оскільки ЛАЧХ має позитивний запас по амплітуді при деяких частотах.
- Система є чутливою до зовнішніх впливів, оскільки ФЧХ має резонансну частоту.

Додаткові відомості:

- Резонансна частота системи становить близько 1 радіана на секунду.
- При частоті 1 радіана на секунду амплітуда вихідного сигналу системи буде максимальною.

Порівняння з попередніми графіками:

- Графіки ЛАЧХ та ФЧХ відкритої системи керування відрізняються від графік ЛАЧХ та ФЧХ скоригованої замкнутої системи.

- Графіки ЛАЧХ та ФЧХ відкритої системи керування мають позитивний запас по амплітуді при деяких частотах, що свідчить про стабільність системи.
- Графіки ЛАЧХ та ФЧХ відкритої системи керування мають резонансну частоту, що свідчить про нечутливість системи до зовнішніх впливів.

Показники якості системи наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Показники якості системи

Встановлена помилка, $\varepsilon_{уст}$ м/с	0,005
Коливання, М	1
Час перехідного процесу по керуючому впливу, $t_{пп}$ с	6,6
Перерегулювання, σ %	0
Запас по фазі, φ град	61
Запас по амплітуді, L дБ	18

З показників якості видно, що покращена автоматична система керування відповідає запропонованим вимогам щодо ефективності функціонування.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

В даному розділі був описаний об'єкт автоматичної стабілізації, включаючи важливу і графічну модель об'єкта та розроблену нелінійну та лінеаризовану математичну модель стабілізаційного об'єкта. Проведено підбір виконавчих та вимірювальних функціональних елементів. Також були отримані та описані лінеаризовані моделі об'єкта автоматичного керування, визначені передавальні функції окремих елементів системи керування з урахуванням стандартних та зовнішніх впливів, побудовані функціональні та структурні схеми. Був проведений динамічний розрахунок системи позиціонування, синтезований контролер був виведений зі стану, відповідно до вимог технічного завдання були отримані показники якості. Також були вивчені частотні характеристики та система була змодельована у середовищі MATLAB.

4. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЕРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВЕУ

Вдосконалення контролера автоматизованої системи вітроенергетичного устанавлення (ВЕУ) є актуальною задачею, спрямованою на підвищення ефективності та надійності роботи системи. Завданням вдосконалення є оптимізація регулюючих алгоритмів та параметрів контролера для досягнення кращого управління процесами генерації електроенергії з вітряної енергії. Введення покращень може бути здійснене через розробку нових алгоритмів, використання передових методів оптимізації та урахування сучасних технологічних рішень.

4.1 Особливості застосування ПІД-регулятора та його властивості

ПІД регулятор - прилад, вбудований в керуючий контур, з обов'язковим зворотним зв'язком. Він призначений для підтримування встановлених рівнів заданих величин, наприклад, швидкості обертів вітродвигуна. Прилад подає керуючий або вихідний сигнал на пристрої регулювання, на основі отриманих даних від датчиків або сенсорів. Контролери забезпечують високими показниками точності перехідних процесів та якості виконання виконаних завдань.

Робота ПІД-регулятора включається в передачу вихідного сигналу про силові потужності, необхідні для підтримання регульованих параметрів на заданому рівні.

Для обрахунку показників використовується складна математична формула, у складі якої є 3 коефіцієнти - пропорційний, інтегральний, диференціальний.

При роботі вітродвигуна може виникати ряд факторів що можуть пошкодити його конструкцію, так і змінити його фізичні параметри. В рамках

даної роботи розглянуто один з таких параметрів як швидкість обертання вала ротора вітродвигуна.

Коли вітродвигун працює в штатному режимі, вітер помірний система функціонує стабільно, раптом виникає сильний порив вітру що посилюється. Внаслідок чого виникає різкий стрибок потужності що може вивести зладу випрямляючий діодний міст чи сам контролер заряду (що призначений для АКБ). Внаслідок чого виникає потреба в регуляторі що зможе згладжувати ці стрибки потужності, які виникають при збільшенні швидкості обертів ротора в ході роботи вітротурбіни, при цьому дані згладжування не повинні зменшувати коефіцієнта корисної дії установки. Задля вирішення даної проблеми потрібно потрібен регулятор що зможе «передбачати» режими роботи установки, в якості такого регулятора обрано ПД-регулятор. Щоб можна було рахувати кількість обертів вала ротора вітродвигуна обрано поширений і надійний датчик Холла.

Отже, нехай вітрогенератор являє собою прилад з диференціальним приводом - генератора. Конструктив поки ніякої ролі не грає, він знадобиться лише в подальшому. На вітродвигуні встановлений блок - джерело енергії, що живить систему. Власне, те, яку потужність буде видавати генератор на цей блок, і буде визначати характер роботи вітродвигуна. Цей блок укупі з вітродвигуном і всіма елементами турбіни називають об'єктом керування. Завдання полягатиме в тому, щоб змусити блок видавати потрібний керуючий сигнал для ефективної роботи вітродвигуна.

На вхід об'єкта управління подається так званий заданий вплив, тобто якийсь сигнал, що визначає те, що має бути на виході об'єкта управління. Це задає вплив позначають як $X_z(t)$, а вихідний сигнал позначають через $y(t)$. Наприклад, якщо потрібно, щоб вал ротора обертася з заданою однаковою швидкістю, то $X_z(t)$ буде представляти собою постійну величину. Якщо ж потрібно, щоб швидкість обертання ротора була іншою, то $x_z(t)$ буде представлено $x_z(t)$ буде відповідною функцією. Тут t , природно є час.

Вихідний сигнал $y(t)$ буде визначати те, як вал ротора насправді обертається. Взагалі ж завдання регулятора полягає в тому, щоб у нас була така система, в якій вихід $y(t)$ відповідав заданому впливу $x_3(t)$ [9].

Теорія автоматичного регулювання (ТАР) - це така дисципліна, яку конкретика завдання і пристрій об'єкта управління не цікавить. Завдання ТАР - вивчати інформаційні процеси, тому замість красивих і наочних натурних схем і рисунків (Рис. 4.1 а) в ТАР використовуються схематичні зображення - структурні схеми.



Рисунок 4.1 – Вітрогенератор (а) і відповідна структурна схема (б)

Під час роботи вітрогенератора виникають різного типу завади і позначають їх як $z(t)$. Насправді не настільки важливо, від чого конкретно стався збій в роботі. Важливо цей збій якось розпізнати і відреагувати на нього належним чином (відкоригувати рух, тобто значення вихідного сигналу $y(t)$). А для цього важливо знати, наскільки потужність вітрогенератора відхилилася від необхідного значення (того, що задається величиною $X_3(t)$). Це відхилення називається сигналом помилки і позначається як $e(t)$.

На структурній схемі (Рис. 4.2.) перешкода $z(t)$ зображена як щось, що впливає на об'єкт керування.



Рисунок 4.2 – Перешкоди і помилки

Отже, щоб змусити вітрогенератор обертатися з заданою кількістю обертів, необхідно вміти визначати помилку при його обертанні, викликану перешкодами. Для цього потрібно оснастити вітрогенератор датчиками, які і будуть вимірювати відхилення значень. Наприклад, можна встановити на вітрогенераторі датчик Холла і спостерігати за швидкістю обертання ротора вітрогенератора. Сигнали від датчика обертів буде надходити на деякий блок, так званий пристрій керування. Пристрій керування (ПК), отримуючи сигнал від датчиків, визначить відхилення і, в залежності від його величини, змусить об'єкт управління видати відповідний вихідний сигнал. За цим сигналом вітрогенератор скорегує свою роботу, датчик визначить нову швидкість обертів вала ротора (і нову помилку) і все повториться спочатку. Іншими словами, отримують [9] систему зі зворотним зв'язком (Рис. 4.3.):

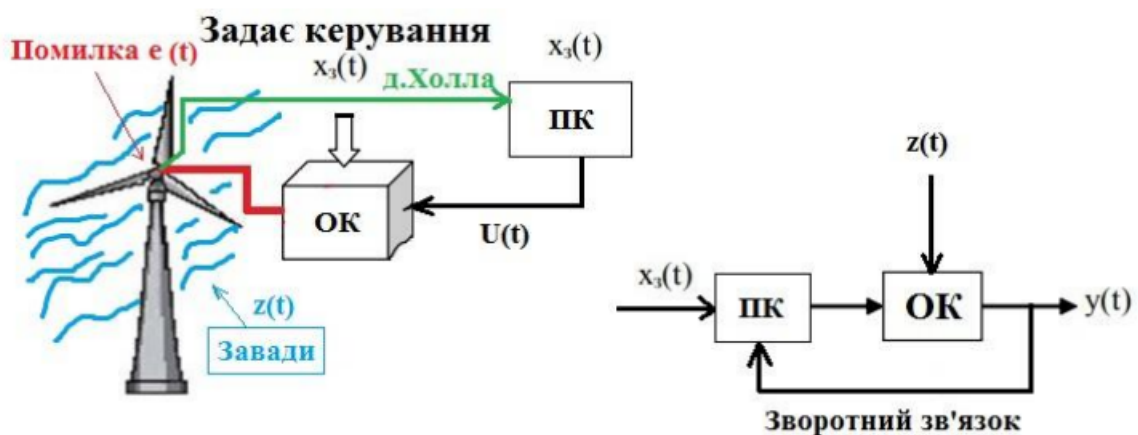


Рисунок 4.3 - Повна схема системи зі зворотним зв'язком

Взагалі, зворотний зв'язок - це наріжний камінь, основоположний принцип ТАР. Дослідження пристрою керування (ПК) і присвячена ця робота [9].

Отже, зворотний зв'язок - це співіслюб обліку помилок в керуванні. Здійснюється вона за допомогу датчиків, які ці помилки в керуванні вимірюють. Схематично це представлено на (Рис. 4.4) вузол, на який надходить сигнал зворотного зв'язку



Рисунок 4.4 – Структурна схема системи

Цей вузол являє собою акумулятор - пристрій, який додає два сигнали: задає вплив $x_3(t)$ і реальний вихідний сигнал $y(t)$. При цьому вхід сигналу зворотного зв'язку позначений мінусом, тобто на пристрій керування ПК надходить різниця цих сигналів. Ця різниця і є сигнал помилки (різниця між тим, що потрібно і що є реально), на який має реагувати ПК. Це – так звана система з негативним зворотним зв'язком. Існують регулятори і без зворотного зв'язку, сам зворотний зв'язок може бути і негативною (сигнали віднімаються), і позитивною (сигнали сумуються) [10-12].

Самі схеми керування можуть бути теж різними. На (Рис. 4.5), представлені дві з них:

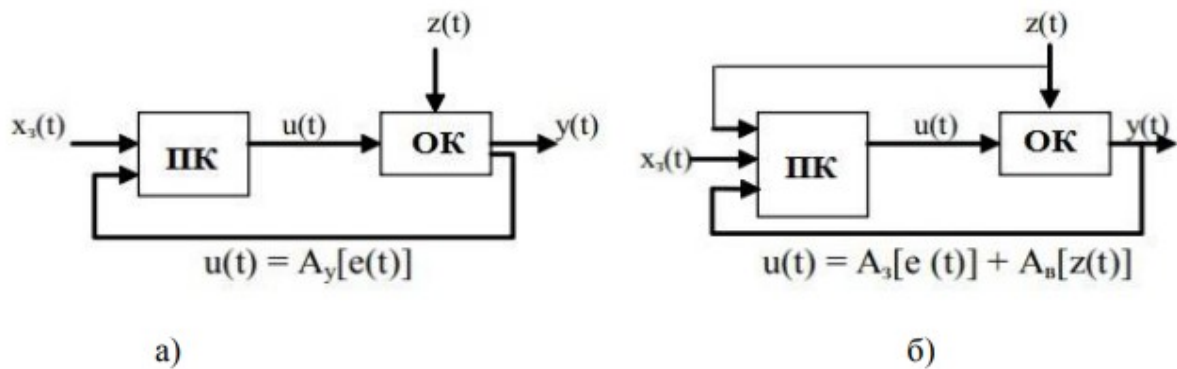


Рисунок 4.5 – Варіанти структурних схем

де а) зображена система, в якій сигнал від ПК $u(t)$ є функцією від помилки $e(t)$ ($u(t) = A_y[e(t)]$); б) сигнал керування $u(t)$ залежить ще і від зовнішнього збурення ($u(t) = A_z[e(t)] + A_n[z(t)]$). Це є складною схемою яка не потребує уваги в магістерській роботі.

Отже, для вирішення завдання керування створюється систему зі зворотним зв'язком (система з замкнутим ланцюгом впливів або просто замкнута система). На вхід ПК надходять як внутрішнє (контрольний) вплив, так і зовнішнє (задаючий).

Управління здійснюється за сигналом помилки (формула 4.1):

$$e(t) = x_z(t) - y(t) \quad (4.1)$$

де, $e(t)$ – сигнал помилки, $x_z(t)$ – який задає керування, $y(t)$ – вихідний сигнал.

4.2 Типові закони керування

Наступний етап - зрозуміти, як сам пристрій керування буде впливати на об'єкт керування та яким чином будуть враховуватися помилки. Треба визначити, яким чином буде сформульований закон керування. Існує безліч варіантів таких законів (принципів) керування, і надалі розглянуті деякі з них.

4.2.1 Пропорційне керування

Нехай вал ротора вітрогенератора відхилився від заданого значення обертів, і датчик зафіксував це відхилення, що відображається відомим сигналом помилки $e(t)$ – наскільки відійшов він від заданого значення. При цьому визначено вплив $xz(t)$, і цей вплив дорівнює 0. Значення $xz(t)$ рівне нулю вказує на те, що вал ротора не повинен відхилитися від заданої кількості обертів, а датчик фіксує необхідну кількість обертів, тобто $y(t) = 0$. Відхилення вліво чи вправо призводить до зміни $y(t)$ на інше значення.

У даному контексті, на кожному кроці часу відомо значення сигналу помилки (за формулою 4.1). Тепер необхідно визначити, як реагувати на цю помилку [13].

Найпростіший і природний варіант полягає в тому, щоб реагувати на неї пропорційно її величині. Якщо відхилення велике (велика помилка), тоді потрібно сильніше збільшувати навантаження (навантаження обмоток статора баластним опором). Невелике відхилення призводить до невеликої зміни це є пропорційний закон керування [10].

Пропорційне керування є найпростішим у реалізації і найчастіше використовується в керуючих системах. У цьому випадку регулятор бере відхилення (сигнал помилки) $e(t)$, множить його на константу і видає його як керуючий вплив $u(t)$.

З того, що керуючий вплив $u(t)$ пропорційний сигналу помилки, випливає, що в якості регулятора можна використовувати звичайний підсилювач. Структурна схема системи представлена на (Рис. 4.6).

У даному випадку використовується простий підсилювач як ПК, який збільшує сигнал помилки в k_p разів. Такий П-регулятор визначається своєю простотою (як простий підсилювач, що може бути реалізований як апаратно, так і програмно) і негайно реагує на будь-яке відхилення, забезпечуючи високу швидкість реакції. Передавальна функція П-регулятора визначається так (формула 4.2):

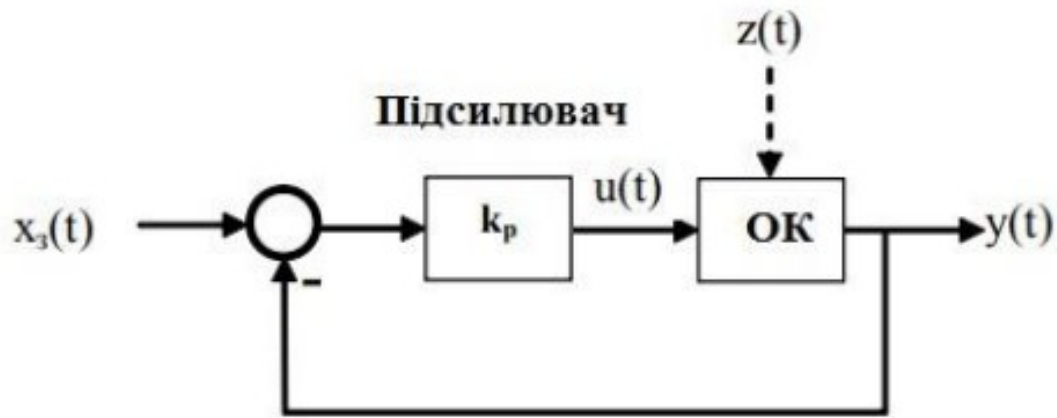


Рисунок 4.6. – Система з пропорційним регулятором

$$W_{per}(p) = \frac{u(p)}{e(p)} = k_p \quad (4.2)$$

$W_{per}(p)$ – ідеальна пропорційна ланка, $u(p)$ – сигнал пристрою керування, що впливає на об'єкт керування, $e(p)$ – сигнал помилки k_p – коефіцієнт підсилювача.

Перевага П-регулятора є те що він простий у використанні і має високу швидкодію. Однак є певні недоліки, такі як обмежена точність, особливо при керуванні об'єктами з великою інерційністю та запізненням, а також можливість перерегулювання. Якість керування, визначається системою утримання необхідної потужності. Якщо система не може забезпечити необхідну потужність, це вказує на її неефективність (Рис. 4.7) [10].

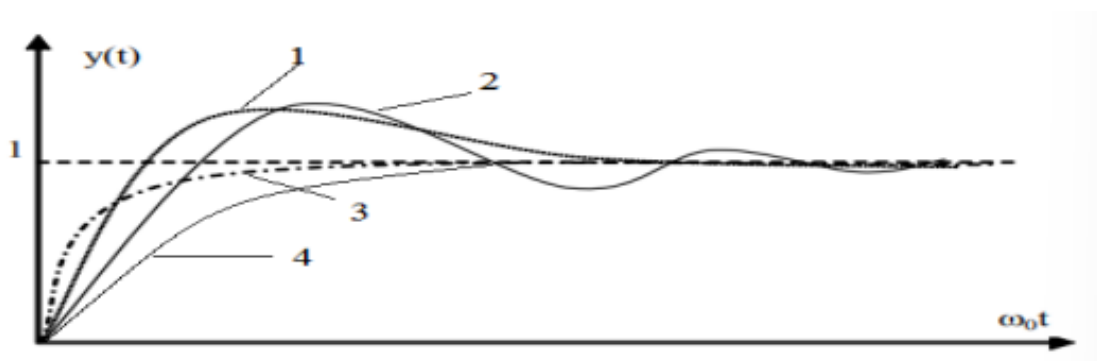


Рисунок 4.7 – Перехідні процеси: реакція системи на одиничний вплив

В залежності від значення коефіцієнта підсилювача k_p , поведінка регулятора вітрогенератора буде різною:

Траєкторія (1): при великому значенні k_p , наприклад, $k_p = 10$, система починає демонструвати коливання з великою амплітудою. Величина максимального відхилення траєкторії від заданої називається перерегулюванням, і чим воно менше, тим краще.

Траєкторія (2): при меншому значенні k_p , наприклад, $k_p = 5$, система веде себе трошки краще, але перерегулювання залишається великим.

Траєкторія (3): при $k_p = 2$ вітрогенератор виходить в режим без коливань, що є більш ефективним керуванням.

Траєкторія (4): при невеликому значенні k_p , наприклад, $k_p = 1$, вихід на режим також здійснюється без коливань, але значно повільніше.

Ці приклади показують, що при пропорційному керуванні можливі неприємності, такі як коливання, перерегулювання і великий час перехідного процесу [11].

Оцінюючи якість регулятора, важливо враховувати реакцію системи на одиничний вплив, визначений як спеціальна функція, стрибком приймаюча значення, рівне 1. Таким чином, отримуємо графік перехідного процесу.

Зазначивши терміни "сталий" і "перехідний режими, ці два поняття є важливими для розуміння принципів роботи системи керування. Режими роботи системи.

В теорії автоматичного керування виокремлюють два основні режими роботи системи.

Сталій режим - це фаза роботи системи, коли всі попередні процеси завершені, і вітрогенератор працює у звичайному режимі.

Перехідний режим - це початковий етап роботи, коли вітрогенератор стартує. У цьому етапі важливіше не сама точність, а швидкість реакції системи. Головною метою є здатність якнайшвидше адаптуватися до змін.

Ідеальна система керування повинна об'єднувати в собі якість та точність реакції. Проте на практиці, часто доводиться шукати компроміси.

Можна зробити висновок що пропорційне керування, хоч і просте у впровадженні, схильне до перерегулювання. Це може призводити до витрат часу на коливальні рухи в умовах роботи вітродвигуна, що не лише може призвести до втрати швидкості, але й до виникнення проблем з експлуатацією установки. Однак важко уникнути використання П-керування, оскільки воно є необхідним компонентом.

Функція для контролера, що реалізує П-керування, може виглядати так:

```
float kp = 10; // Коефіцієнт пропорційної ланки
float Pctl (float error)
{
Float up; up = kp * error; return up;
}
```

Функції передається один параметр - величина сигналу помилки *error*, а повертає вона значення керуючого сигналу *u* - величину помилки, помножену на коефіцієнт підсилювача П-регулятора k_p .

4.2.2 Пропорційно-диференціальне керування

Продовжуючи розгляд аспектів якості регулятора, слід відзначити, що пропорційний регулятор не може повністю задовольнити всі вимоги. Ситуацію, коли помилка керування стрімко збільшується, наприклад, при частих поривах вітру для вітрогенератора. Тут критичним є не тільки точність управління, але й швидкість реакції на зміни. Інтенсивні пориви вказують на необхідність ефективнішого регулювання потужності, а також на важливість урахування швидкості зміни помилки.

Для оптимального управління важливо мати інформацію не лише про поточну помилку (сьогодення), але й про майбутню помилку, що дозволяє оцінити швидкість зміни помилки. Якщо спостерігається зростання помилки (інтенсивність зміни помилки), то необхідно активізувати вплив на управління.

Для вимірювання цієї швидкості застосовується пристрій, відомий як диференціатор.

Диференціатор володіє простою в реалізації структурою і має завдання множення різниці між поточним значенням вихідного сигналу та значенням виходу на константний коефіцієнт згідно з (формулою 4.3).

$$u_d(t) = k_d(y(t) - y(t - 1)) \quad (4.3)$$

де $u_d(t)$ - значення керуючого сигналу, k_d - постійний коефіцієнт, $y(t)$ - поточне значення вихідного сигналу (в момент часу t), $y(t - 1)$ - попереднє значення вихідного сигналу (в момент часу $t - 1$).

Принцип роботи диференціальної компоненти (Д-компоненти). Якщо вихідний сигнал є сталим ($y(t) = y(t-1)$), то значення $u_d(t)$ дорівнює нулю, і жодних змін не відбувається. Однак, якщо відбуваються зміни, диференціальна компонента реагує на ці зміни. Чим більше величини вихідного сигналу відрізняються між собою, тим більший внесок вносить ця компонента [11].

Можна зробити висновок що використання лише Д-компоненти в регуляторі є неприпустимим. Якщо помилка керування є постійною (завжди $y(t) = y(t-1)$), то ця компонента не виявить жодної реакції на це. Таким чином, Д-компонента працює в парі з пропорційною компонентою.

Отже, так отримується пропорційно-диференціальний (ПД-регулятор), який зображено на схемі регулятора (Рис. 4.8).

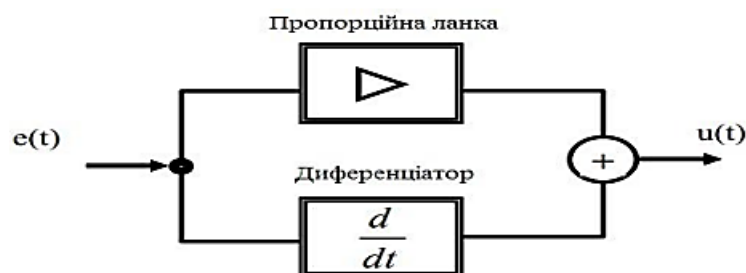


Рисунок 4.8 – ПД-регулятор

У цьому випадку сигнал помилки використовується як для пропорційної ланки (підсилювача), так і для диференціюючої ланки (диференціатора). Після цього вихідні сигнали цих компонент об'єднуються, формуючи керуючий вплив $u(t)$. Таким чином, функціонування ПД-регулятора можна описати наступним співвідношенням (формула 4.4):

$$u_{pd}(t) = u_p(t) + u_d(t) = k_p e(t) + k_d (y(t) - y(t - 1)) \quad (4.4)$$

де $u_d(t)$ – сума керуючого впливу ПД-регулятора, $u_p(t)$ – підсилювач, $u_d(t)$ – диференціатор, $k_p e(t)$ – сигнал помилки коефіцієнту підсилення, k_d – коефіцієнт диференціатору, $y(t)$ – поточне значення вихідного сигналу (в момент часу t), $y(t - 1)$ – попереднє значення вихідного сигналу (в момент часу $t - 1$).

Передавальна функція ПД-регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p) = k_n + k_\delta p = k_p + k_d T_d p \quad (4.5)$$

де T_d – так звана постійна часу.

Далі описується ідеальна диференційована ланка, але в реальності передавальна функція може бути складнішою. Пропорційно-диференційний закон керування викликає більший інтерес, оскільки він є більш цікавим, ніж просто пропорційне керування. У нього є свої переваги та недоліки.

Переваги полягають в тому, що цей закон керування має найвищу швидкодію. Пропорційно-диференційний (ПД) регулятор реагує не лише на величину відхилення $e(t)$, але також на швидкість його зміни. Проте недоліками ПД-регулятора є низька точність і чутливість до шумів.

Диференціальна компонента керування представляє собою особливу проблему серед усіх типів керування. Це пов'язано з тим, що диференціальна компонента дуже чутлива до швидкості зміни помилки. Здебільшого, не для кожної помилки необхідно реагувати.

Проблема шумів виникає через загальний характер шумового впливу в системі. Усі аспекти, починаючи від шуму датчиків, які не завжди надають потрібні дані, до високочастотних шумів, створюють складнощі для регулятора з диференційною компонентою (Д-компонентою). Д-регулятор відповідає на різні шуми, змушуючи систему реагувати на непотрібні втручання в ситуаціях, де реакція не обов'язкова. Проблема особливо гостро виражена у високочастотних шумах, які тимчасово виникають, але можуть значно вплинути на процес.

Потрібно врахувати, що шумовий вплив, який був перерахований раніше, є високочастотним, і його короткотривалий характер може створювати проблеми для Д-регулятора. З іншого боку, низькочастотні перешкоди, такі як вигини траси, є важливими для реакції регулятора, оскільки вони є низькочастотними порівняно з швидкістю процесів у системі керування. Рішенням може бути встановлення фільтра низьких частот для Д-компоненти, який відсікатиме високочастотні перешкоди. Однак цей підхід виходить за межі розглядуваної дисертації.

Чутливість до частоти збору інформації є значущим аспектом у контексті пропорційно-диференційного керування (ПД-керування). Оскільки у ПД-законі використовується сигнал "в попередній момент часу", важливо забезпечити строгий інтервал часу для збору інформації. Надто великі відхилення в часі можуть серйозно впливати на адекватність реакції системи. Рекомендується, щоб часові інтервали дотримувалися точності не менше 1%.

Програмна реалізація вирішення цієї проблеми може включати використання переривань. Обробник переривань має містити коротку та ефективну процедуру збору інформації від датчиків. Головна складність полягає у тому, щоб забезпечити стабільні та точні часові інтервали.

Враховуючи вищеописані труднощі, ключова проблема ПД-регулятора полягає в підсиленні шумів в системі. Якщо шуми не можна ефективно усунути, то застосування Д-компоненти може бути неоптимальним рішенням. Узагальнено, пропорційно-диференційне керування надає оптимальну

швидкодію, однак його недоліки включають обмежену точність та високу чутливість до шумів [13-15].

Функція для контролера, що реалізує ПД-управління, може виглядати так:

```
float kp = 10; // Коефіцієнт пропорційної ланки
float kd = 1; // Коефіцієнт диференціальної ланки
float old_y = 0; // Попереднє значення сигналу
float PDctl (float error, float y)
{Float up, ud;
// Пропорційна компонента up = kp * error;
// Диференціальна компонента ud = kd * (y-old_y); old_y =
y;
return up + ud;
}
```

Функції передається два параметри - величина сигналу помилки *error* і значення вихідного сигналу *y*. Повертає вона значення керуючого сигналу *u* - суму пропорційної і диференціальної компонент регулятора. Глобальна (а можна зробити її і статичної) змінна *old_y* служить для зберігання попереднього значення вихідного сигналу.

4.2.3 Інтегральне керування

Основна проблема, що виникає в ПД-регулятора, пов'язана з його чутливістю до шумів та чи можна вирішити цю проблему, згладжуючи шуми, та при цьому забезпечити максимальну точність регулювання в сталому режимі. Для цього може бути використана інтегруюча ланка, відома як інтегратор.

Інтегратор виконує накопичення сигналу помилки $e(t)$, і керуючий сигнал $u(t)$ в кожний момент часу пропорційний інтегралу помилки $e(t)$. Таким чином, І-регулятор реагує на тривалі відхилення керованої величини, в той час як короточасні відхилення згладжуються.

Якщо розглядається інтеграл як площа під кривою, утвореною функцією (оскільки інтегрується помилка - функцією $e(t)$), то можна зробити висновок, що площі фігур, побудованих на (Рис. 4.9 (а) і (б)), приблизно однакові.

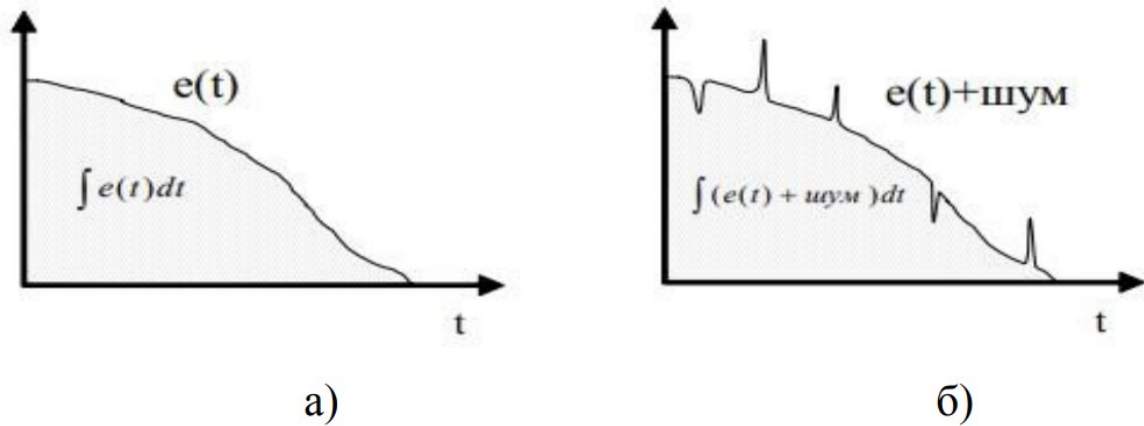


Рисунок 4.9 – Інтеграли від функції помилки приблизно рівні

де а) функція помилки без високочастотних перешкод, б) функція помилки з високочастотними перешкодами.

Отже, інтегральний закон керування (І-регулятор) виглядає наступним чином (формула 4.6):

$$u_i(t) = k_i \int e(t) dt \approx k_i \sum e(t) \Delta t \quad (4.6)$$

де k_i - інтегруючий коефіцієнт, Δt - різниця часу.

Передавальна функція І-регулятора (формула 4.7):

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{k_i}{p} = \frac{k_u}{T_i p} \quad (4.7)$$

Розглядається ідеальний інтегратор, який у реальних умовах має відмінну передавальну функцію.

Проте процес інтеграції помилок є потенційно небезпечним. Завжди існують помилки, і їх просте накопичення може призвести до зниження стабільності системи або зробити її абсолютно нестабільною.

Застосування чистого І-регулювання може викликати зростання коливань системи, які поступово посилюватимуться, поки система не втратить стабільність. Точно з цієї причини інтегратор використовується в поєднанні з пропорційною ланкою. Така комбінація утворює пропорційно-інтегральний закон керування (ПІ-регулятор) за формулою 4.8.

$$u_{pi}(t) = u_p(t) + u_i(t) = k_d e(t) + k_i \int e(t) dt \approx k_p e(t) + k_i \sum e(t) \Delta t \quad (4.8)$$

де $u_{pi}(t)$ – ПІ - регулятор, $u_i(t)$ – інтегратор, k_i – інтегральний коефіцієнт. На (Рис. 4.10) представлена структурна схема ПІ-регулятора.

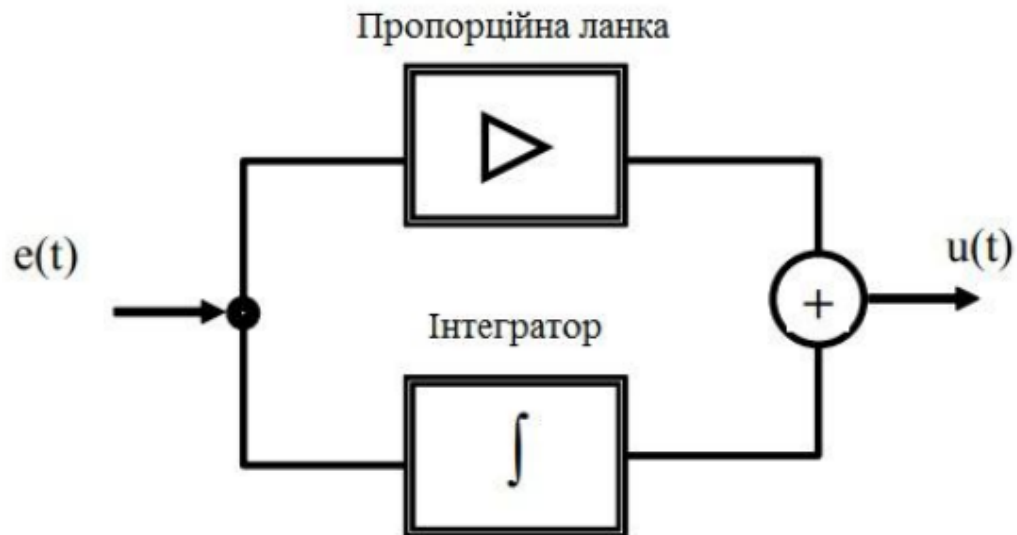


Рисунок 4.10 – ПІ-регулятор

Передавальна функція ПІ-регулятора (формула 4.9):

$$W_{\text{рег}}(p) = k_n + \frac{k_u}{p} \quad (4.9)$$

де p – пропорційна складова.

Використання інтегрального керування спрямоване на підвищення "довгострокової точності" управління і, майже завжди, використовується у сполученні з пропорційним керуванням. Паралельне з'єднання обох ланок дозволяє використовувати переваги П- і І-регуляторів.

ПІ-регулятори широко використовуються в промисловій автоматичі.

Переваги:

- ПІ-регулятор перевершує П-регулятор за точністю в сталому режимі, і при відповідному співвідношенні коефіцієнтів k_p і k_i ;
- ПІ-регулятор забезпечує добрі показники як у сталому, так і в перехідних режимах.

Недоліки:

- його характеристики погіршуються в перехідних режимах, де спостерігається менша швидкодія і великі коливання.

З метою запобігання цього системи через постійне накопичення помилок, зазвичай обмежують роботу інтегратора, встановлюючи мінімальне і максимальне значення накопиченого сигналу.

Це зазвичай допомагає уникнути припинення роботи системи - необмеженого зростання керуючого впливу.

Можна зробити висновок ПІ-регулятор проявляє високу ефективність в сталому режимі, де він максимально точний і не реагує на високочастотні шуми. В перехідних режимах його використання може призвести до появи коливальних процесів, і він є досить повільним.

Функція для контролера, що реалізує ПІ-управління, може виглядати так:

```
float kp = 10; // Коефіцієнт пропорційного ланки
float ki = 0.001; // Коефіцієнт інтегрального ланки;
#define iMin -0.2 // Мінімальне значення інтегратора
```

```

#define iMax 0.2 // Максимальне значення інтегратора;
float iSum = 0; // Сума помилок (значення, накопичене в
інтеграторі); float P1ctl (float error)
{
float up, ui;
// Пропорційна компонента up = kp * error;
// Інтегральна компонента
iSum = iSum + error; // Накопичуємо (підсумовуємо) if (iSum
iMax) iSum = iMax; ui = ki * iSum; return up + ui;
}

```

Мінлива *iSum* - це інтегратор, який зберігає суму всіх попередніх помилок. Величини *iMin* і *iMax* - це мінімальне і максимальне дозволені значення стану інтегратора. Вони і обмежують інтегральний вплив.

4.2.4 Пропорційно-інтегрально-диференціальне керування

Залишається об'єднати всі компоненти, і в результаті отримати найбільш гнучкий закон керування - пропорційно-інтегрально-диференціальний. Зміни в його параметрах дають можливість реалізувати інші закони, що об'єднують у собі як переваги, так і недоліки окремих компонентів.

Кожна складова регулятора (пропорційна, інтегральна і диференціальна ланки) виконує своє завдання і вносить свій конкретний вплив на функціонування системи: пропорційний закон реагує на поточну помилку, диференційний передбачає майбутні зміни помилки, а інтегральний враховує минулі помилки, згладжуючи високочастотні шуми.

Вихідні сигнали цих елементів об'єднуються, утворюючи керуючий сигнал для пристрою. Схема отриманого ПІД-регулятора представлена на (Рис. 4.11).

Закон ПІД-керування виглядає як сума вхідних до складу ПІД-регулятора керуючих компонент (формула 4.10):

$$u_{pid}(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d (y(t) - y(t - 1)) \quad (4.10)$$

де $u_{pid}(t)$ – сума вхідних до складу ПІД-регулятора

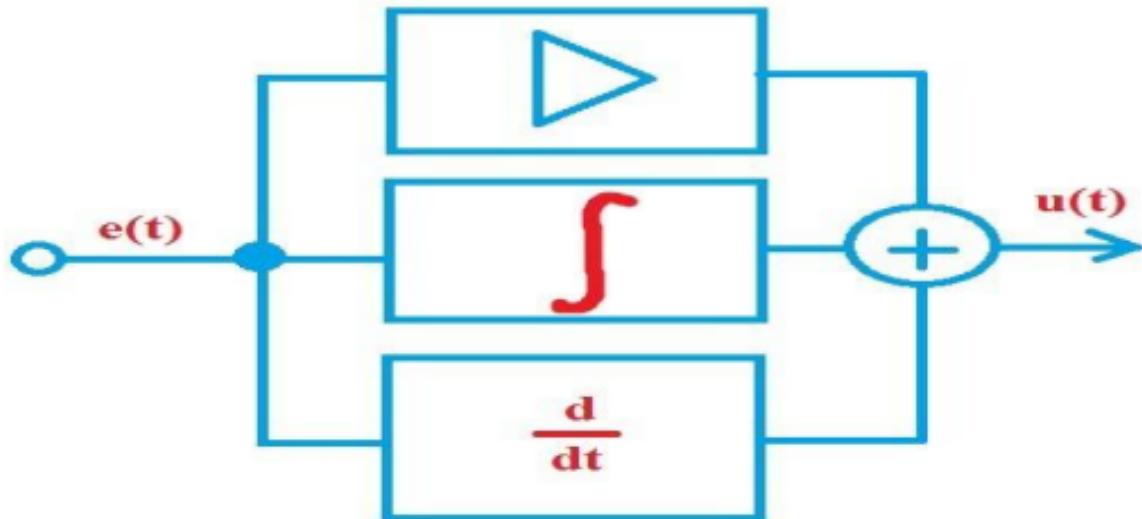


Рисунок 4.11 – ПІД-регулятор

Передавальна функція ПІД-регулятора (формула 4.11):

$$W_{\text{рег}}(p) = k_n + \frac{k_u}{p} + k_\delta p \quad (4.11)$$

Узагальнена структурна схема системи, що використовує ПІД-регулятор, зображена на (Рис. 4.12).

ПІД-регулятор, хоч і був запатентований ще в 1910 році, знайшов своє визнання значно пізніше, а у 1942 році, коли Зіглер і Нікольс розробили методику його ефективного налаштування.

Не дивлячись на широке поширення, протягом тривалого періоду часу ПІД-регулятор залишався високотратним і складним пристроєм. Проте з появою мікропроцесорів у 80-х роках минулого століття розвиток та впровадження ПІД-регуляторів взяло шалений розгін. На сьогодні ПІД-

регулятори є одними з найпоширеніших типів регуляторів. Вважається, що майже 90% в експлуатації знаходяться регуляторів використовують ПІД-алгоритм, і це в основному пов'язано з їх низькою вартістю.

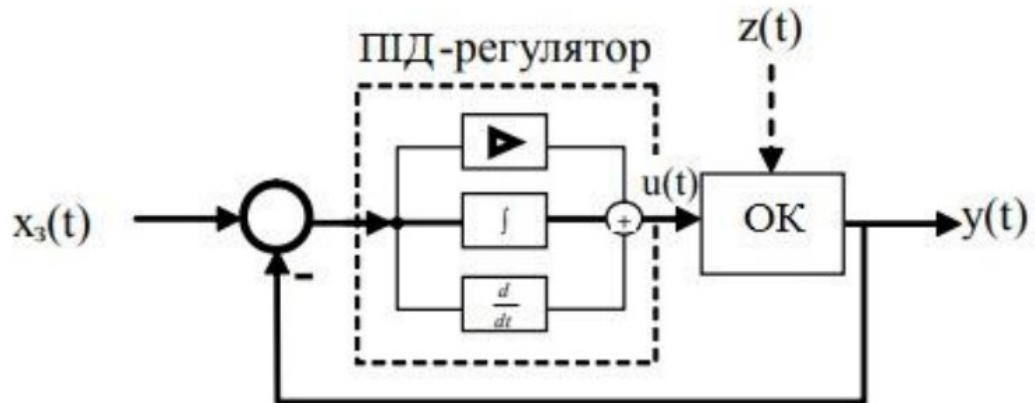


Рисунок 4.12 – Система з ПІД-регулятором

Можна зробити висновок з програмної реалізації, функція, що виконує ПІД-керування, представляє собою просту композицію усіх розглянутих компонентів.

```
// Параметри пропорційної ланки
float kp = 10; // Коефіцієнт пропорційної ланки
// Параметри інтегратора
float ki = 0.001; // Коефіцієнт інтегральної ланки
#define iMin -0.2 // Мінімальне значення інтегратора
#define iMax 0.2 // Максимальне значення інтегратора:
float iSum = 0; // Сума помилок (значення, накопичене в
інтеграторі)
// Параметри диференціатора
float kd = 1; // Коефіцієнт диференціальної ланки float
old_y = 0; // Попереднє значення сигналу:
float PIDctl (float error, float y)
{
```



```

Float up, ui, ud;
// Пропорційна компонента  $u_p = k_p * \text{error}$ ;
// Інтегральна компонента
iSum = iSum + error; // Накопичуємо (підсумовуємо)
if (iSum < iMin) iSum = iMin; // Перевіряємо граничні
значення if (iSum > iMax) iSum = iMax; ui = ki * iSum;
// Диференціальна компонента  $u_d = k_d * (y - \text{old}_y)$ ; old_y =
y;
return up + ui + ud;
}

```

Отже, функція ПД-регулятора дійсно дуже проста. Основною проблемою при реалізації ПД-керування є налагодження його параметрів.

4.3 Способи налаштування ПД-регулятора в системі керування вітродвигуна

Відбір оптимальних параметрів ПД-регулятора (коефіцієнтів k_p , k_i і k_d) є завданням, яке несе в собі значні труднощі. Ефективність цього вибору залежить від складу системи, характеристик її компонентів та призначення завдання. У випадку вибору коефіцієнтів для регулювання в різних умовах, на увазі тримається активне використання диференційної компоненти (з великим коефіцієнтом k_d) в ускладнених умовах, в той час як для спокійного режиму роботи вітродвигуна інтегральна компонента набуває значущості.

Теоретичний підхід до вибору параметрів передбачає побудову структурної схеми системи та обчислення функції передачі системи, що вимагає знань усіх характеристик вхідних компонентів. Однак на практиці цей підхід ускладнюється врахуванням нелінійностей та випадкових факторів.

Інженерний метод передбачає створення тестового стенду з вимірювальним обладнанням, що дозволяє етапно впливати на систему та аналізувати її відгук. Параметри регулятора відбираються на основі аналізу

перехідної функції системи. Цей метод вимагає високої кваліфікації та доступу до обладнання.

У реальних умовах налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора є більш простим. Експериментальний підхід включає проведення натурних випробувань вітрогенератора. При ввімкненні спостерігається його роботою та ефективністю, та коригуємо значення коефіцієнтів до досягнення оптимальної продуктивності.

Регулювання пропорційної складової включає в себе необхідність адаптації значення параметра k_p в залежності від швидкості реакції системи. У випадку повільної реакції системи рекомендується збільшувати значення k_p . У випадку виникнення коливань, слід зменшувати цей параметр. Деякі методи включають методику початкового визначення невеликого значення k_p . Якщо коливань немає, значення k_p поступово збільшується в 10 разів до їх виникнення. Після цього параметр k_p послідовно зменшується вдвічі, а не в 10 разів. Цей цикл повторюється, доки коливання не припиняться, використовуючи спочатку великі, а потім все менші кроки.

Установка коефіцієнта інтегральної компоненти, позначеного як k_i , передбачає його невелике значення у порівнянні з параметром k_p . Початкове значення k_i рекомендується вибирати в діапазоні від 0.0001 до 0.01. Процедура підбору коефіцієнта k_i аналогічна процесу налаштування пропорційної складової (спочатку використовуються великі значення, а потім зменшуються). Застосування занадто великого значення k_i також може призвести до виникнення коливань.

Налаштування диференціальної компоненти включає в себе введення цього коефіцієнта в систему припущень про великі шуми. Початкове значення коефіцієнта k_d встановлюється на рівень 0, а також встановлюється невелике значення коефіцієнта пропорційної ланки k_p (наприклад, $k_p = 1$) для того, щоб уникнути коливань при нульовому значенні k_d . Потім встановлюється невелике початкове значення k_d (наприклад, $k_d = 0.1$). Процес збільшення коефіцієнта k_d триває до виявлення помилкових коливань, спричинених невеликими шумами. Важливо встановити коефіцієнт в половину або чверть від того, при якому

починаються коливання від занадто великої його величини, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Під час використання методу Зіглера для підбору коефіцієнтів k_p , k_i і k_d ПІД-регулятора спершу обнуляють вказані коефіцієнти. Процес полягає у поступовому збільшенні значення k_p і уважному спостереженні за реакцією системи з урахуванням виникнення стійких незгасаючих коливань. Період коливань системи (T) вимірюється.

Зберігаючи початкове значення k_p як k_0 , визначають кінцеві значення коефіцієнтів ПІД-регулятора:

1. $k_p = 0.6 * k_0$,
2. $k_i = 2 * k_p / T$,
3. $k_d = k_p * T / 8$.

Важливо враховувати, що процеси налаштування мають певний ступінь суб'єктивності. Незважаючи на те, що основним критерієм є зовнішня поведінка вітродвигуна, важливо також дотримуватися об'єктивних принципів при створенні регулятора.

Швидкодія програми - важливий аспект, що передбачає використання ефективних та лаконічних алгоритмів і простих операцій для максимальної продуктивності. Рівномірність роботи програми також є ключовим фактором, оскільки необхідно уникати пауз системи на непередбачений час, щоб уникнути збоїв в інтегральній та диференціальній ланках. Для досягнення цього можна використовувати переривання, які гарантовано забезпечують рівномірний збір інформації від датчиків.

При визначенні частоти збору даних і виконання циклу керування важливо уникати як занадто низької, так і занадто високої частоти. Занадто низька частота може призвести до неефективності системи і навіть до неможливості стабілізації. З іншого боку, занадто висока частота може спричинити шуми в диференціальній компоненті та переповнення інтегратора. За визначенням частоти керування слід керуватися правилом, що тривалість ітерації керуючого циклу повинна знаходитися в межах від 1/10 до 1/100 бажаного часу стабілізації системи.

Наприклад, якщо система повинна стабілізуватися за 0.1 секунди, то частота керування повинна бути від 100 до 1000 Гц.

4.4 Програмний алгоритм налаштування ПІД-регулятора

Під час аналізу програмного коду виявлено певні характеристики. Алгоритм ПІД-регулятора представлений у вигляді схеми (Рис 4.13) і може бути використаний безпосередньо у скетчі (Рис. 4.13).

```
void setup() {
}
void loop() {
  //(вхід, встановлення, п, і, д, період в секундах, хв. вихід, макс. виход)
  //analogWrite(pin, computePID(sensorRead, 30, 1.0, 2.0, 3.0, 0.02, 0, 255));
  //delay(20);
}
//функція під
int computePID(float input, float setpoint, float kp, float ki, float kd, float dt, int minOut, int maxOut) {
  float err = setpoint - input;
  static float integral = 0, prevErr = 0;
  integral = constrain(integral + (float)err * dt * ki, minOut, maxOut);
  float D = (err - prevErr) / dt;
  prevErr = err;
  return constrain(err * kp + integral + D * kd, minOut, maxOut);
}
```

Рисунок 4 13 – Скетч програми з використанням мови програмування C
Бібліотека класичного PID регулятора для Arduino

Характеристика коду програми:

- швидка і легка бібліотека;
 - час одного розрахунку близько 70 мкс;
 - режим роботи по величині або по її зміни (для інтегруючих процесів);
 - вибір цілочисельного або float модель обчислення;
 - повертає результат по вбудованому таймеру або в ручному режимі;
- ПІД регулятор отримує дві величини на вхід:

- `input` - це сигнал з датчика, представляючий швидкість обертання ротора вітрогенератора.
- `setpoint` - це значення, яке регулятор буде стежити, намагаючись відповідати вхідному сигналу.

Вихідний (керуючий) сигнал `output`, який генерується ПІД регулятором, впливає на вхідний сигнал. Цей сигнал використовується для управління пристроєм, таким як нагрівач, який впливає на роботу об'єкта та генерує вихідні дані для датчика обертів.

Об'єкт ПІД регулятора можна налаштовувати трьома різними варіантами:

1. `GyverPID regulator`; - форматування без налаштувань, де всі параметри мають значення за замовчуванням, і інтервал часу `dt` дорівнює 100 мс.
2. `GyverPID regulator(kp, ki, kd)`; - форматування з введенням коефіцієнтів, де `dt` залишається стандартним значенням 100 мс.
3. `GyverPID regulator(kp, ki, kd, dt)`; - форматування з введенням коефіцієнтів та власного значення `dt` в мілісекундах.

Регулятор має різні режими та налаштування:

- напрямок регулювання залежить від того, в який бік змінюється керована величина `input` при збільшенні керуючого сигналу `output` (наприклад, розгін чи гальмування). Режим `NORMAL` вважає, що збільшення `output` збільшить `input`, встановлюється командою `setDirection(dir)`, де `dir` - `NORMAL` або `REVERSE`.

- режим регулювання `ON_ERROR` або `ON_RATE`, де `ON_ERROR` використовується за замовчуванням. Рекомендується використовувати його для більшості процесів, оскільки більшість процесів є самоустановлювальними. Режим `ON_RATE` рекомендується для інтегруючих процесів, встановлюється командою `setMode(mode)`, де `mode` - `ON_ERROR` або `ON_RATE`.

- значення вихідного сигналу обмежуються в межах 0-255 (для 8-бітного ШІМ) за замовчуванням, але можуть бути змінені командою `setLimits(min, max)`.

- час ітерації можна змінювати під час роботи регулятора.

Час ітерації, визначений в мілісекундах, впливає на функцію `getResultTimer()`. Ця функція робить новий розрахунок керуючого сигналу з вказаним періодом. Крім того, цей час враховується при розрахунках керуючого сигналу, включаючи пропорційну та диференційну складові. Час ітерації можна встановити командою `setDt(dt)`, де `dt` - час ітерації в мілісекундах.

Параметри регулятора можна змінювати в будь-якому місці програми з використанням зручного методу, такого як кнопки, енкодер, передача даних через UART/GSM/WiFi та інші. Коефіцієнти регулятора K_p , K_i і K_d можна встановити і читати безпосередньо як члени класу, подібно до того, як зображено на (Рис.4.14).

```
regulator.Kp = 1.5; // встановити
regulator.Ki += 0.7; // змінити
lcd.print(regulator.Kd); // читати
```

Рисунок 4.14. – Коефіцієнти регулятора

Час ітерації можна змінювати, викликавши метод `setDt()`. Величини регулятора, такі як вхід, встановлення і вихід, є членами класу і можуть бути звертані безпосередньо для читання і запису, як показано на (Рис.4.15).

```
regulator.input = 10; // ВХІД регулятора
regulator.setpoint = 20; // ВСТАНОВЛЕННЯ регулятора, необхідний параметр
analogWrite(regulator.output); // ВИХІД з регулятора можна подавати напряму до ШІМ
```

Рисунок 4.15 – Величини регулятора

Бібліотека володіє режимом цілочисельних обчислень, що призводить до менших розмірів коду і покращення швидкодії. За замовчуванням встановлено режим чисел з плаваючою точкою. Заголовок бібліотеки містить змінні та функції, які можуть бути налаштовані на тип `float` або `int`. Це налаштування

виконується шляхом визначення макросу перед включенням бібліотеки, як показано на (Рис. 4.16).

```
#define PID_INTEGER  
#include "GyverPID.h"
```

Рисунок 4.16. –Приклади бібліотек призначені для тексту

Для взаємодії з бібліотекою потрібно передавати поточні значення величини в `input`, необхідне значення в `setpoint`, виконувати розрахунки за допомогою методу `getResult()` або `getResultTimer()`, а потім використовувати отриману вихідну величину `output` для керування пристроєм. Це актуально для швидких процесів, вимагаючи частих оновлень, тоді як для повільних процесів, таких як утримання заданої швидкості обертання, можна використовувати більші інтервали часу (наприклад, декілька секунд).

Метод `getResult()` виконує розрахунки при кожному виклику і повертає значення `output`, тоді як `getResultTimer()` робить розрахунок тільки при виклику вбудованого таймера. Таким чином, `getResult()` викликається за власним таймером, а `getResultTimer()` слід викликати якнайчастіше, адже він розраховує значення тільки при спрацьовуванні свого таймера.

Після отримання результату можна використовувати вихідну величину `output` для подачі керуючого сигналу на керуючий пристрій.

4.5 Тестування розробленого ПІД-регулятора на платформі Arduino

Для проведення тесту необхідно забезпечити обертання ротора вітродвигуна із швидкістю 300 обертів на хвилину. Після цього підключається Arduino та на виході значення з СОМ-порту.

Експерименти з розробленою моделлю ПІД-регулятора включають такі етапи:

- встановлюється всі коефіцієнти (K_p , K_i , K_d) на значення 0.
- починається поступове збільшення значення K_p та відстежується реакція системи. Мета - досягнення стійких коливань системи, викликаних перерегулюванням. Збільшується K_p до моменту, коли коливання системи стабілізуються і перестануть згасати.
- запам'ятовується поточне значення K_p (позначається як K_u) і вимірюємо період коливань системи (T_u).
- використовуються отримані значення K_u і T_u для розрахунку всіх параметрів ПД-регулятора за формулами (4.13).

$$K_p = 0.6 * K_u$$

$$K_i = 2 * \frac{K_p}{T_u} \quad (4.13)$$

$$K_d = K_p * T_u / 8$$

В кодї програми для дискретних регуляторів враховано період дискретизації (T), який обробляється шляхом помноження K_i та T , а K_d розділяється на T . У даному кодї період становить 30 мс, а пін тахометра обов'язково підтягується до спільного живлення через `attachInterrupt(0, isr, FALLING)`.

Значення фільтрується в середині бібліотеки за допомогою `pid.input = tachometer.getRPM()`. Підрахунок виконується через `pid.getResult()`. Обробка на ШІМ виконується за допомогою `analogWritePWMPIN, pid.output`. Виведення графіків і значень здійснюється через порт Arduino Nano, як показано на (Рис.4.17).

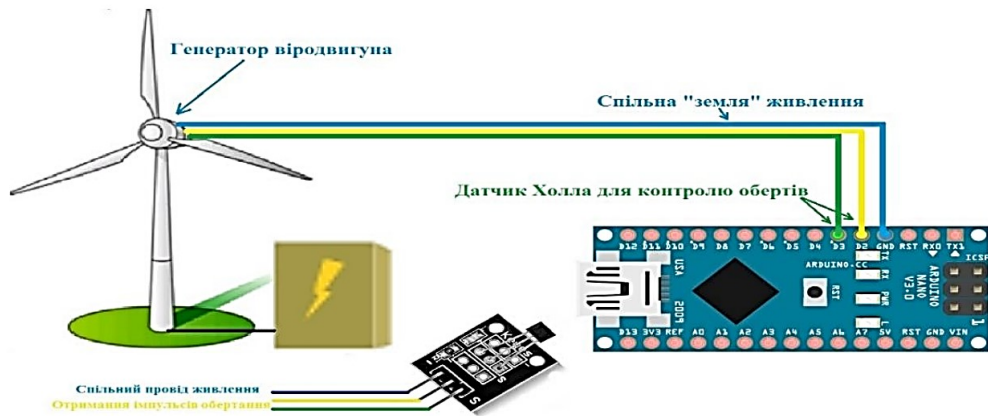


Рисунок 4.17. – Датчик Холла для заміру швидкості обертання віродвигуна і плата Arduino в якості контролера

Отримаємо дані, які представлені на (Рис 4.18).

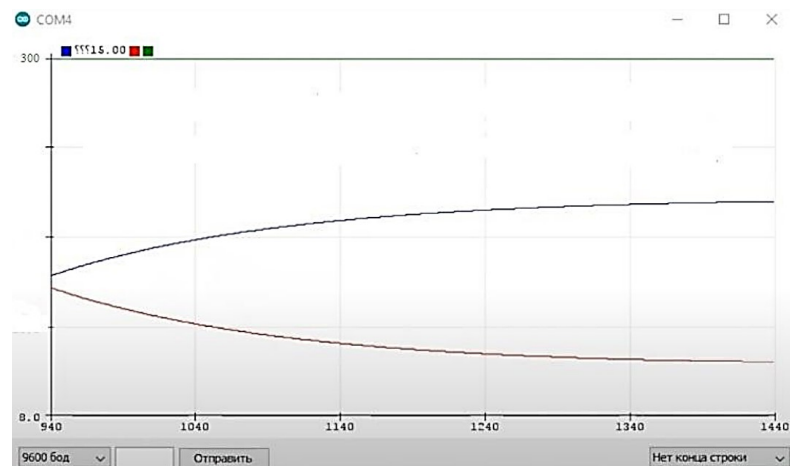


Рисунок 4.18. – Графік сигналів П-регулятора при 1

На (Рис. 4.18) зображено графік сигналів П-регулятора при 1.

Вертикальна вісь показує значення сигналів, а горизонтальна вісь показує час.

Сигнал помилки (синій графік) показує різницю між заданим значенням і фактичним значенням вихідного сигналу. У цьому випадку задане значення дорівнює 1, а фактичне значення змінюється в часі.

Сигнал регулювання (червоний графік) показує величину впливу регулятора на вихідний сигнал. У цьому випадку регулятор пропорційно реагує на величину сигналу помилки.

Вихідний сигнал (зелений графік) показує значення вихідного сигналу системи. У цьому випадку вихідний сигнал прагне до заданого значення 1.

З графіка видно, що сигнал управління (U) має постійне значення, яке дорівнює 1.

Сигнал помилки (E) змінюється в залежності від значення вхідного сигналу (Y).

Сигнал регулювання (R) є пропорційним до сигналу помилки.

Висновки:

- П-регулятор є простим регулятором, який просто пропорційно реагує на сигнал помилки.
- у цьому випадку П-регулятор підтримує постійне значення вхідного сигналу.

Додаткові відомості:

- рівень сигналу управління (U) можна регулювати, змінюючи коефіцієнт пропорційності П-регулятора.

Складова P не залежить від часу і представляє собою просте множення помилки. Формула P складової, не враховує часовий аспект і є незмінною складовою системи. Якщо значення П збільшити з 1 до 5, отримаємо зображену на (Рис. 4.19) динаміку.

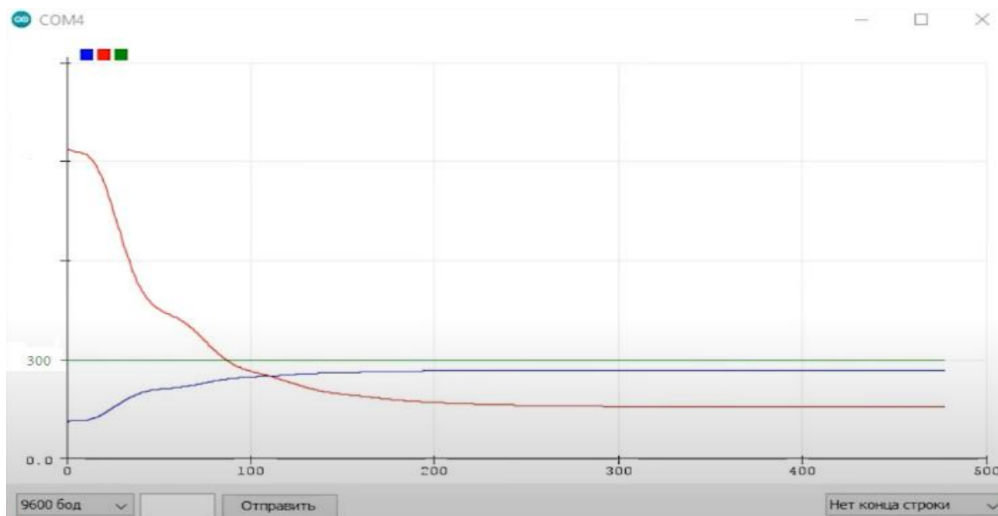


Рисунок 4.19. – Графік сигналів П-регулятора при 5

У порівнянні з графіком 4.18, на якому коефіцієнт пропорційності П-регулятора дорівнював 1, на цьому графіку коефіцієнт пропорційності дорівнює 5. Це означає, що у цьому випадку П-регулятор буде набагато більш жорстким. Це означає, що він буде реагувати на зміни вхідного сигналу більш швидко і більш різко. Таким чином, П-регулятор з коефіцієнтом пропорційності 5 буде більш ефективним у підтримці постійного значення вхідного сигналу, ніж П-регулятор з коефіцієнтом пропорційності 1. Однак, він також буде більш схильний до коливань, оскільки буде реагувати на зміни вхідного сигналу більш різко.

Після збільшення P до 5, спостерігається стрибок керуючого сигналу, після чого система приходить знову до рівноваги так і не досягнувши установки, але тепер вона набагато ближче (синій сигнал). Якщо P збільшити до 15 можна отримати наступне, як видно з (Рис. 4.20).

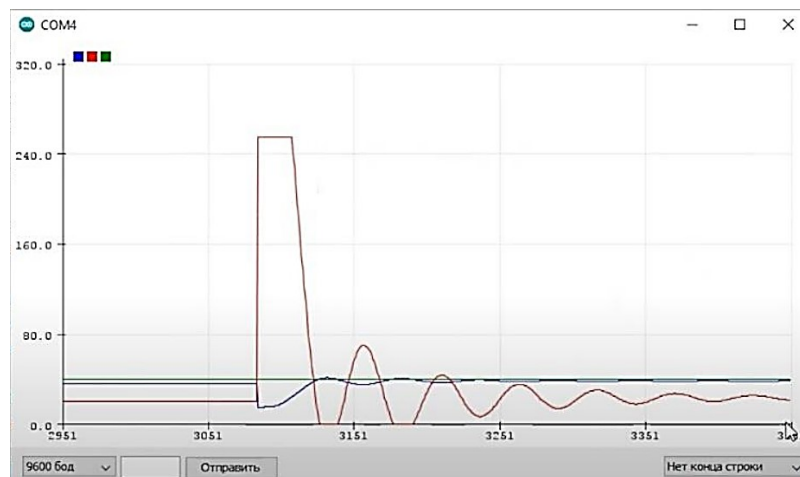


Рисунок 4.20. – Графік сигналів П-регулятора при 15

З (Рис. 4.20) видно, що викликані стрибки коливань швидко затухають. Після збільшення значення параметра P до 20 виявлено, що коливання стають незатухаючими. Це пояснюється тим, що система не ідеальна, і виникають запізнення. Регулятор зменшує керуючий сигнал, проте оберти продовжують зростати через інерцію турбіни вітрогенератора.

Однак, у порівнянні з графіками 4.18 та 4.19, на яких коефіцієнт пропорційності П-регулятора дорівнював 1 та 5 відповідно, на цьому графіку коефіцієнт пропорційності дорівнює 15. Це означає, що у цьому випадку П-регулятор буде набагато більш жорстким. Це означає, що він буде реагувати на зміни вхідного сигналу ще швидше і ще різкіше. Навіть при припиненні керування турбіна не може миттєво зупинитися через свою інерцію, яка призводить до незатухаючих коливань, як показано на (Рис. 4.21).



Рисунок 4.21. – Графік сигналів П-регулятора при 20

У такому випадку регулятор ефективно зменшує керуючий сигнал, і система починає заспокоюватися. Проте ситуація повторюється в протилежному напрямку, і цей цикл продовжується. Коефіцієнт P спрямований на зменшення статичної помилки на кожному етапі регулювання. Чим більший коефіцієнт P , тим менше помилка, але велике значення може призвести до "розкачування" системи.

П-регулятор з коефіцієнтом пропорційності 20 буде ще більш ефективним у підтримці постійного значення вхідного сигналу, ніж П-регулятор з коефіцієнтом пропорційності 15. Однак, він також буде ще більш схильний до коливань, оскільки буде реагувати на зміни вхідного сигналу ще різкіше.

Для зниження помилки до нуля використовується інтегральна складова, яка сумує помилку в саму себе. Вираз для обчислення вихідного сигналу має вигляд (формула 4.14):

$$out = I * ki, I = I + (setpoint - input) * dt, \quad (4.14)$$

де dt – період дискретизації системи;

Наприклад збільшивши коефіцієнт і симуляції до 0,2 в кодї програми отримаємо сигнали, які зображені на (Рис. 4.22):

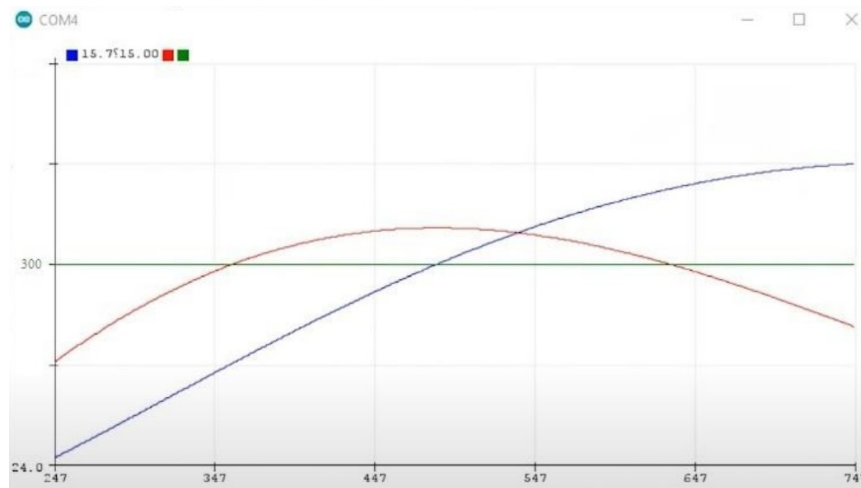


Рисунок 4.22. – Графік сигналів ПІ-регулятора

На (Рис. 4.22) зображено графік сигналів ПІ-регулятора, зростання.

Вертикальна вісь показує значення сигналів, а горизонтальна вісь показує час.

З графіка видно, що сигнал управління (U) спочатку зростає, а потім стабілізується на рівні 20.

Сигнал помилки (E) змінюється в залежності від значення вхідного сигналу (Y).

Сигнал регулювання (R) є пропорційним до сигналу помилки, а також залежить від інтегралу сигналу помилки.

Висновки:

- ПІ-регулятор є складнішим регулятором, ніж П-регулятор. Він не тільки пропорційно реагує на сигнал помилки, але також інтегрує сигнал помилки.

- у цьому випадку ПІ-регулятор підтримує постійне значення вхідного сигналу, яке дорівнює 20.

Додаткові відомості:

- рівень сигналу управління (U) можна регулювати, змінюючи коефіцієнти пропорційності та інтеграції ПІ-регулятора.

Порівняння з попередніми графіками:

- графік сигналів ПІ-регулятора відрізняється від графік сигналів П-регулятора.

- графік сигналів ПІ-регулятора містить сигнал вихідного сигналу системи (X). Це означає, що ПІ-регулятор є регулятором замкненої системи.

Ці відмінності пояснюють те, що ПІ-регулятор є складнішим регулятором, ніж П-регулятор. Він може компенсувати зовнішні впливи, а також підтримувати постійне значення вхідного сигналу.

Особливості графіка:

- сигнал управління (U) спочатку зростає, а потім стабілізується на рівні 20. Це означає, що ПІ-регулятор підтримує постійне значення вхідного сигналу, яке дорівнює 20.

- сигнал помилки (E) змінюється в залежності від значення вхідного сигналу (Y). Це означає, що ПІ-регулятор реагує на зміни вхідного сигналу.

- сигнал регулювання (R) є пропорційним до сигналу помилки, а також залежить від інтегралу сигналу помилки. Це означає, що ПІ-регулятор реагує на зміни вхідного сигналу як пропорційно, так і інтегрально.

Висновки:

- ПІ-регулятор з коефіцієнтами пропорційності та інтеграції 10 і 10 є ефективним у підтримці постійного значення вхідного сигналу. Він також є стабільним, оскільки не має коливань.

Система починає працювати, і помилка починає накопичуватися, що призводить до зростання обертів і навіть перевищення ліміту через установку, як зображено на (Рис.4.23).

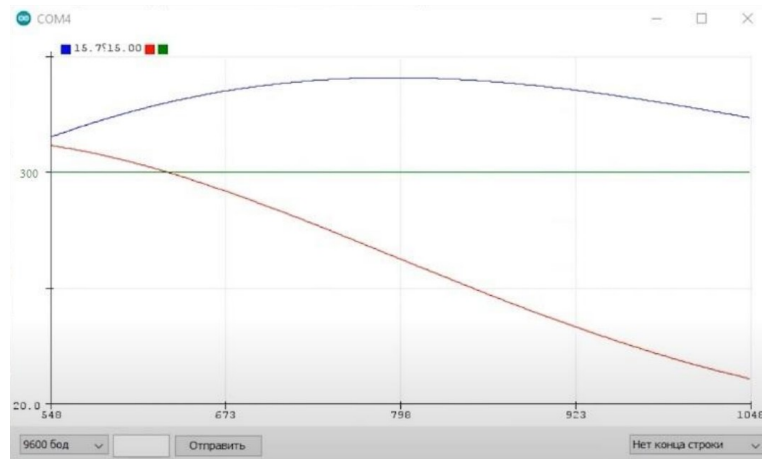


Рисунок 4.23. – Графік сигналів ПІ-регулятора, зростання

Інтегральна складова (позначена червоним) починає зменшуватися через те, що помилка стала від'ємною. Подальші коливання мають характер згасання, як показано на (Рис. 4.24).

Система доходить до заданого режиму, коли інтегральна складова формує керуючий сигнал, при якому помилка стає рівною нулю. Вибравши значення $P = 5$ (відображено червоною лінією) і значення $i = 0,5$ (відображено синьою лінією), результат практично ідеальний процес, як показано на (Рис.4.25).

На заключному етапі експерименту з налаштуванням ПІД-регулятора за допомогою ручного підбору коефіцієнтів зображено на (Рис. 4.26), виявляється що регулятор впевнено та ефективно встановлює параметри процесу, уникаючи перепрограмань.

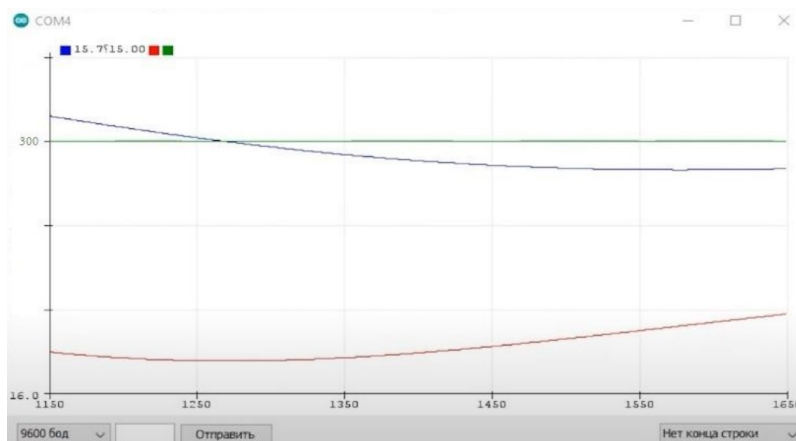


Рисунок 4.24. – Графік сигналів ПІ-регулятора, згосання

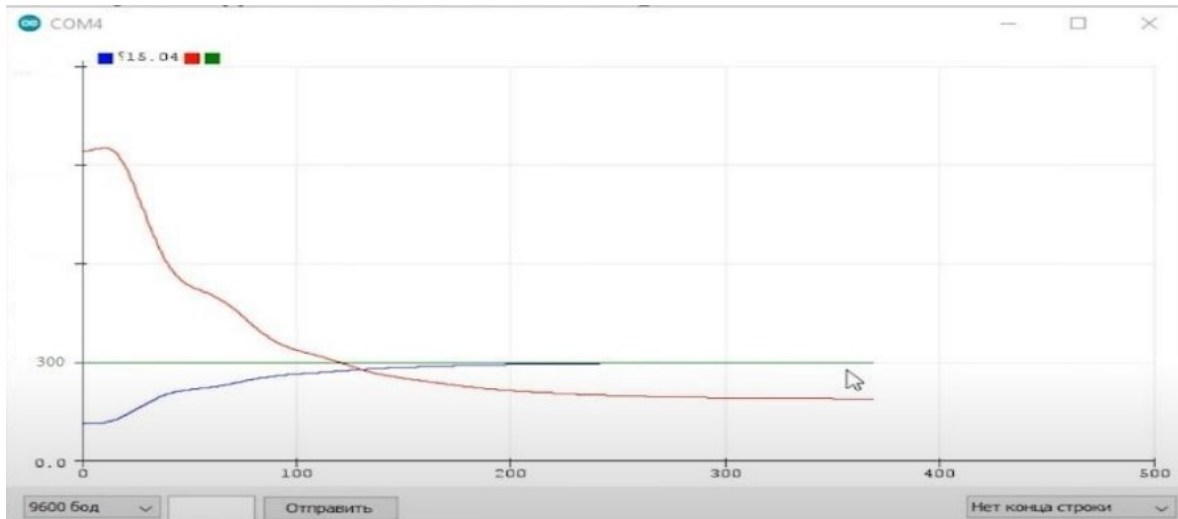


Рис. 4.25. – Графік сигналів ПІ-регулятора при 0,5

Узагальнюючи, компонента Р надійно коригує поточну помилку в реальному часі, інтегральна складова успішно виправляє минулі невірності, в той час як диференціальна складова орієнтована на усунення майбутніх системних відхилень.

Це вказує на те, що регулятор є налаштованим, оскільки він демонструє плавну та точну реакцію системи. На останньому етапі експерименту ретельно аналізуються різні показники програми, такі як:

// result: PI p: 0.57 PI i: 0.86 PID p: 0.90 PID i: 0.94 PID d: 0.14,



Рисунок 4.26. – Графік сигналів ПІД-регулятора

На графіку видно, що синьою лінією представляється реальна частоту обертів, зелена лінія вказує на очікуване значення частоти обертів вітродвигуна, а червоним показано керуючий сигнал.

Наступним завданням в експерименті було перевірити реакцію системи при введенні навантаження на вихід вітродвигуна. Ротор вітродвигуна продовжує обертатися із швидкістю 300 обертів за хвилину. Запускається програма, та отримані дані представлені на (Рис 4.27).

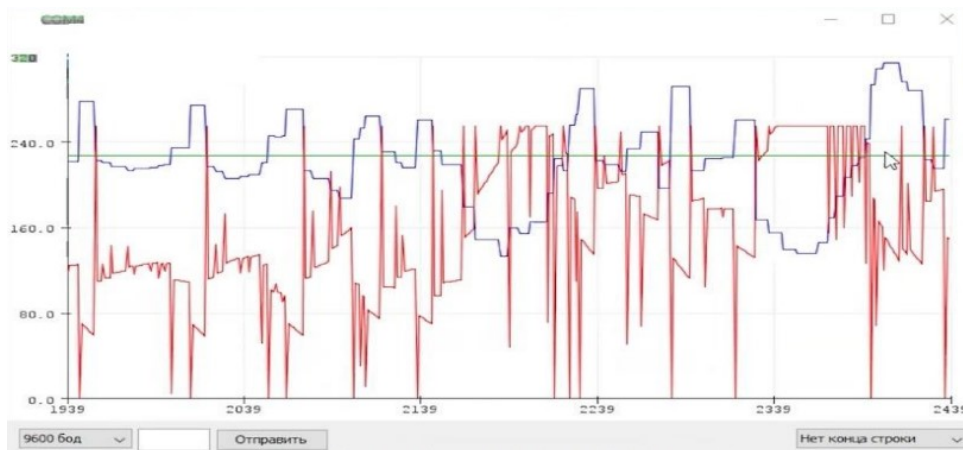


Рисунок 4.27. – Графік сигналів налаштованого ПД-регулятора.

На діаграмі видно, що червоний сигнал індикує те, що керуючий сигнал в даному випадку спрямований на компенсацію "просадки" у роботі вітродвигуна.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Отже, нехай вітрогенератор являє собою прилад з диференціальним приводом - генератора. Варто відзначити, що конструктив доки не має значення, він знадобиться лише в подальшому. На вітродвигуні встановлений блок - джерело енергії, що живить систему. Власне, те, яку потужність буде видавати генератор на цей блок, і буде визначати характер роботи вітродвигуна. Цей блок разом з вітродвигуном і всіма елементами турбіни називають об'єктом керування. Наше завдання якраз і полягатиме в тому, щоб змусити блок видавати потрібний керуючий сигнал для ефективної роботи вітродвигуна.

Щоб змусити вітрогенератор обертатися з заданою кількістю обертів, необхідно вміти визначати помилку при його обертанні, викликану перешкодами. Для цього можна (і потрібно) оснастити вітрогенератор датчиками, які і будуть вимірювати відхилення значень.

Отже, зворотний зв'язок - це спосіб обліку помилок в керуванні. Здійснюється вона за допомогу датчиків, які ці помилки в керуванні вимірюють.

Проаналізувавши типові закони керування та дослідивши пропорційне керування, пропорційно-диференціальне керування та інтегральне керування, можна зі впевненістю стверджувати, що пропорційно-інтегрально-диференціальне керування забезпечує найкращу швидкодію. Більш того, завдяки тому, що ПІД-регулятор реагує не тільки на величину сигналу помилки, але і на швидкість його зміни, при керуванні досягається ефект попередження (прогнозування поведінки помилки). Недоліками ж ПІД-закону може бути обмежена точність і чутливість до різного роду шумів. ПІД-регулятор хороший в сталому режимі. Він максимально точний і не реагує на високочастотні шуми.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Заходи з охорони праці під час експлуатації вітрових турбін

Технічне обслуговування вітроенергетичних установок необхідно здійснюватися відповідно до ГКД 41.003.003.007 бригадою, яка складається не менше, ніж з двох осіб [16]. Така бригада створюється в залежності від кількості і потужності вітрогенераторів, має бути забезпечена спеціальним транспортом, набором спеціальних інструментів і пристосувань, а також комплектом запасних частин до приладів серійного виробництва. Робота бригад техобслуговування вітрових турбін виконується протягом дня. Організація роботи вітротурбін повинна забезпечувати їх безперебійну роботу в допустимих режимах, надійне функціонування пристроїв управління, захисту та автоматики, в синхронних генераторах - системах збудження. У цьому випадку повинні бути виконані вимоги інструкції з експлуатації виробника. Інструкція з експлуатації вітрових турбін повинна відповідати вимогам пункту 5.8.11 цих Правил і ГКД 341.003.003.007. При експлуатації вітрових турбін необхідно дотримуватися таких умов:

- застосування заходів безпеки при роботі з даним типом вітрових турбін;
- технічне обслуговування вітрових турбін має здійснюватися тільки персоналом, який пройшов спеціальну підготовку;
- для кожної вітрової турбіни повинні бути складені форми або протоколи результатів профілактичного огляду і технічного обслуговування;
- допускається зняття ущільнень з обладнання, опломбованого виробником тільки з його згоди і в присутності його представника;
- протягом гарантійного терміну експлуатації в разі виходу з ладу елементів компоненти повинні бути відправлені виробникові.

Під час роботи вітрової турбіна потрібно строго дотримуватися всіх її режимів і параметрів, встановлених виробником, умови його прямого підключення до промислової мережі повинні бути виконані через трансформатор

в складі вітроелектростанції. Такі установки, потужністю менше 20 кВт, підключаються до електричних мереж споживача та експлуатуються відповідно до інструкції заводу-виробника.

При наявності потенціалу вітру, достатнього для підвищення параметрів встановленого режиму роботи вітрових турбін, допустимість якого підтверджена виробником, може короткочасно перевищувати свою номінальну потужність не більше, ніж на 5% [16].

Автоматична система управління вітровою турбіною повинна забезпечувати роботу в режимі управління власною автоматизацією, а також в режимі роботи в складі системи автоматизованого управління вітроелектростанцією. Після ремонту або оптимізації системи управління віротурбін перед їх підключенням до мережі потрібно виконати перевірку всіх систем управління вітровими турбінами. В процесі експлуатації система автоматичного управління і контролю віротурбін повинна забезпечити виконання таких функцій:

- запуск вітрових турбін і включення їх в мережу;
- управління та діагностику приладів і обладнання;
- стабільна підтримка номінального навантаження при швидкості вітру у випадку перевищення номінальної;
- програмна і аварійна зупинка вітрових турбін;
- обмеження частоти обертання ротора в межах допустимих меж для перезапуску навантаження, пов'язані з відключенням вітрових турбін від мережі;
- орієнтація ротора в напрямку вітру;
- подача інформації на верхній рівень управління.

Огляд систем управління вітровими турбінами на предмет миттєвого скидання навантаження потрібно виконувати шляхом відключення від мережі в наступних випадках:

- при введенні в експлуатацію вітрових турбін після установки або капітального ремонту;
- після ремонту або оптимізації системи управління вітровими турбінами.

Запуск вітрових турбін заборонено у наступних випадках:

- в разі несправності системи діагностики, технологічного та електричного захисту;

- в разі сейсмічних та інших природних впливів (обмерзання, град, снігопад), які перевищують допустимі значення, зазначені в заводській документації.

Вітрова турбіна повинна бути негайно вимкнена і зупинена для захисту штатного персоналу у випадку:

- перевищення допустимого рівня вібрації окремих вузлів;

- перевищення допустимої температури контрольованих вузлів;

- витік масла;

- збільшення частоти обертання ротора вітряної турбіни вище допустимого значення;

- перевищення швидкості вітру над встановленим значенням швидкості відключення;

- виникнення короткого замикання в системі генерації;

- перевантаження генератора по потужності вище допустимих значень;

- пожежа; - виникнення ситуації, небезпечної для обслуговуючого персоналу;

- виникнення зовнішніх умов, зазначених в пункті 11.3.9 цих Правил.

Вітрова турбіна повинна бути відключена від мережі і зупинена за рішенням технічного керівника вітрового парку в таких випадках:

- виявлення несправності в його механізмах і системах;

- відмова окремих каналів захисту й діагностики;

- отримання повідомлення про прогнозовані сейсмічні дії;

- виникнення зовнішніх умов, небезпечних для експлуатації вітроустановки.

Необхідно регулярно перевіряти опорні конструкції, лопаті і електричні системи. Лопаті ротора дуже міцні, проте, якщо вони увійдуть в контакт з

твердим предметом, то можуть зламатися. Щоб забезпечити безпечну роботу, при виборі місця для турбіни необхідно виключити подібні контакти.

При виконанні періодичних перевірок або в будь-який час, коли доведеться опинитися на шляху руху лопатей, проводи електроживлення від акумуляторів потрібно від'єднати і з'єднати один з одним вихідні проводи вітротурбіни з метою зупинки (гальмування) обертання лопатей. Для нових турбін потрібний короткочасний період обкатки. Підшипникам, які встановлені як в віслю поворотного пристрою турбіни, так і в роторі турбіни, потрібно 60-100 годин експлуатації при нормальній швидкості вітру (приблизно 8-9 м/с), і лише після цього вони досягнуть повної ефективності.

Під час експлуатації необхідно вживати заходів для захисту вітрогенератора від природних явищ, зокрема правильної установки фундаменту. Якщо фундамент вежі неправильно розрахований або неправильно влаштований дренаж фундаменту, щогла від сильного пориву вітру може впасти.

При низьких температурах необхідно вжити заходів проти обмерзання, яке може збільшити масу лопатей і знизити ефективність роботи вітрогенератора. Для експлуатації при низьких температурах частини вітрогенератора повинні бути виготовлені зі спеціальних морозостійких матеріалів.

Рідини, що використовуються в генераторі, не повинні замерзати, оскільки може замерзнути обладнання, яким заміряють швидкість вітру. В цьому випадку ефективність вітрогенератора може серйозно знизитися. Через обледеніння прилади можуть показувати низьку швидкість вітру, і ротор залишиться нерухомим. Від ударів блискавок в вітрогенераторі має бути передбачено грозозахист - на гондолі вітрогенератора встановлюють спеціальний загострений штир-блискавковідвід, а також влаштовують згідно стандартів і нормативів заземлення.

Необхідно стежити за станом заземлення. При порушеному заземленні удари блискавок можуть призвести до пожежі, яка виникає у випадку удару блискавки, тертя обертових частин всередині гондоли, витоку масла з гідравлічних систем, обриву кабелів і ін. Пожежі вітрогенераторів виникають

рідко, але їх важко гасити через віддаленості вітрових електростанцій і великої висоти, на якій виникає пожежа. На сучасних вітрогенераторах встановлюються системи пожежогасіння.

5.2 Техніка безпеки при монтажі і експлуатації системи стабілізації

В вітроенергетичних установках необхідно передбачити [17]:

- ізоляцію струмопровідних частин;
- ізоляцію елементів для здійснення захисного заземлення металевих неструмоведучих частин установки, які можуть опинитися під напругою (при порушенні ізоляції, режиму роботи устаткування і т.п.);
- ізоляцію елементів, що відключають установку від мережі, коли доступні для дотику частини установки виявляються під напругою, в тому числі і грозових розрядів, оболонки для запобігання можливості випадкового дотику до струмоведучих, рухомих, нагрітих частин установки.

При необхідності установки повинні бути обладнані оглядовими вікнами, люками і засобами місцевого освітлення. До додаткових електрозахисних засобів в електроустановках до 1000 В відносяться [18]:

- діелектричні калоші;
- діелектричні килими;
- ізолюючі підставки і накладки;
- ізолюючі ковпаки.

Працівники, які виконують роботи в електроустановках, повинні мати професійну підготовку, що відповідає характеру роботи. Перевірка стану здоров'я працівника проводиться до прийому його на роботу, а також періодично, в порядку, передбаченому законодавством [19].

Електротехнічний персонал до допуску до самостійної роботи повинен бути навчений прийомам звільнення потерпілого від дії електричного струму, надання першої допомоги при нещасних випадках. Якщо потерпілий попав під дію струмопровідних частин, необхідно, перш за все, звільнити його від дії

електричного струму. При цьому слід мати на увазі, що торкатися до людини, що знаходиться під струмом, без застосування належних запобіжних заходів небезпечно для життя особі, яка надає допомогу. Тому першою дією при наданні допомоги має бути швидке відключення тієї частини електроустановки, до якої торкається потерпілий.

5.3 Пожежна безпека і мікроклімат при експлуатації вітроелектростанцій

Пожежа завдає величезної матеріальної шкоди. Всі працівники повинні проходити спеціальну протипожежну підготовку [20]:

- протипожежний інструктаж (первинний і вторинний);
- заняття з пожежно-технічного мінімуму за спеціальною програмою.

Причинами пожежі в вітроелектричних установках є:

- іскріння в електричному роторі і комутаційних з'єднаннях;
- струми короткого замикання і перевантаження, що приводять до займання ізоляції;
- іскріння від електростатичних розрядів і ударів блискавки;
- погані контакти в з'єднаннях проводів;
- електродуги між контактами комутаційних апаратів;
- електродуги під час зварювальних робіт;
- перевантаження або замикання в обмотках трансформатора при несправності релейного захисту;

Причинами пожеж неелектричних характеру можуть бути:

- необережне поводження з вогнем при газозварювальних роботах або роботах з паяльною лампою;
- несправності печей і опалювальних приладів;
- несправності виробничого обладнання (нагрів підшипників, механічне іскріння);
- самозаймання деяких матеріалів.

Якщо палаюча електроустановка не відключена і знаходиться під напругою, то гасіння її становить небезпеку ураження електричним струмом. Як правило, гасити ручними засобами пожежу електроустаткування слід при знятій з нього напрузі [20].

Якщо зняти напругу неможливо, то допускається гасіння установки, що знаходиться під напругою, але з дотримання особливих заходів. Порошковий вогнегасник типу ОПС-10 наповнюється в якості вогнегасного засобу сухим порошком (кальцинована або двовуглекисла сода, поташ та ін.). Вогнегасник складається з балона місткістю 10 л, заповненого вогнегасним порошком. До корпусу прикріплений балон з інертним газом (азот), що знаходяться під тиском близько 15 МПа.

При відкриванні вентиля порошок з балона напором газу виштовхується в шланг, а потім через розтруб подається до вогнища загоряння.

На підприємствах для працюючих навколишнім середовищем є повітря робочих зон і прилеглих до них територій. Дуже важливу роль відіграє мікроклімат виробничих приміщень, який характеризується впливом на організм людини одночасно температури, вологості, швидкості руху повітря, а також тепловим і електромагнітними випромінюванням, вмістом в повітрі шкідливих речовин і наявністю певного рівня шуму і вібрацій.

Найважливішою складовою частиною повітря є кисень, необхідний для існування всієї живої природи. Основний виробник кисню рослинність. Тому для підтримки необхідної кількості кисню в атмосфері слід вживати заходів до збереження і розширення рослинного світу, в першу чергу лісів, необхідно збільшувати площі зелених насаджень в населених пунктах, а також на території захисних зон навколо виробничих будівель і промислових підприємств в цілому.

З метою запобігання та обмеження негативного впливу вітроенергетичних установок необхідно проводити наступні заходи:

- враховувати характер ландшафту при розміщенні вітрогенераторів;
- при виборі місця розміщення вітрогенератора враховувати його вплив сприйняття під усіма відповідними кутами спостереження;

- підтримувати однаковий розмір і конструкцію вітрогенератора (наприклад, напрямок обертання, висоту);
- рівень шуму можна обмежити за рахунок використання турбін зі змінною швидкістю або лопатей із змінним кутом нахилу, що дозволяє знизити швидкість обертання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

В даному розділі наведені правила поводження з вітроенергетичними установками, правилами їх експлуатації та техніка безпеки на при монтажі і технічному обслуговуванні. Щоб умови праці співробітників були безпечними, необхідно дотримуватись наведених норм та правил поведінки на даному підприємстві. Процеси отримання електроенергії при допомозі вітроенергетичних установок пов'язані з небезпекою ураження електричним струмом та травмування від руху механічної частини. Тому необхідно строго дотримуватись технологічного режиму та правил експлуатації зазначених установок відповідно затверджених нормативів та Правил улаштування електроустановок

ВИСНОВОК

На основі вивчення конструктивних та технологічних особливостей промислових вітрогенераторів можна зробити наступні висновки.

Вертикальний вітрогенератор має менший момент початкового руху, тому він здатний працювати при найменших швидкостях вітру. Горизонтальний вітрогенератор є більш потужним, отже, він може жити прилади значно більшою потужністю.

Вертикально-вісьові вітрогенератори встановлюються на землі, що полегшує доступ до генератора та їхнє обслуговування.

Вертикальні вітрогенератори не бояться вітру різного напрямку або бурі, оскільки вони мають мінімальний опір вітру. Ці якості дозволяють встановлювати ці вітрогенератори недалеко від житла, навіть у містах.

У середньому більшість сучасних горизонтальних вітроенергетичних установок характеризується коефіцієнтом використання вітру, який дорівнює 0,48. З результатів спеціальних досліджень випливає, що цей коефіцієнт можна збільшити. Наприклад, у деяких конструкцій вітроенергетичних установок, що відрізняються вдосконаленими аеродинамічними характеристиками, коефіцієнт використання енергії вітру може досягати значення, що дорівнює 0,593.

Горизонтально-вісьові вітрогенератори мають вищий коефіцієнт корисної дії ($\eta = 40 - 59\%$). Такі вітрогенератори можуть використовуватися як для домашнього використання, так і для промислового виробництва електроенергії. Вітрогенератори промислового призначення мають достатньо велику потужність, яка може бути збільшена в сотні разів завдяки встановленню в кожному вітропарку кількох сотень вітряків.

Певним недоліком горизонтальних вітрогенераторів можна вважати необхідність постійного пошуку вітру за допомогою флюгера, який є додатковим пристроєм у складі ВЕУ, ускладнюючи конструкцію та підвищуючи її вартість. З урахуванням вищезазначених переваг вітрогенераторів горизонтально-вісьового типу та їхнього вже впровадженого промислового виробництва ми

робимо висновок про доцільність встановлення цієї конструкції як альтернативного джерела енергії.

За наданим описом, горизонтальний вітрогенератор, що розглядається у магістерській роботі, відноситься до класу "В" згідно з класифікацією. Такий вітрогенератор використовується для автономних одногенераторних вітроустановок, які не підключені до енергосистеми для паралельної роботи.

Тож обравши тип та клас вітрогенератора можна більш детально описати побудову систем автоматичного керування ВЕУ.

На підставі наведеного порівняння у магістерській роботі між двох попередніх схем доцільно використовувати систему, в якій вхідними сигналами є швидкість вітрового потоку $I(v)$, крутний момент на валу вітродвигуна $I(M)$ і кутова частота обертання вала вітродвигуна $I(\omega)$ (Рис. 2.3). При цьому датчик вітрового потоку ДВ повинен встановлюватися не тільки перед площиною обертання вітродвигуна, але і над нею це є оптимальним варіантом вирішення завдання.

Далі був описаний об'єкт автоматичної стабілізації системи, включаючи важливу і графічну модель об'єкта та розроблену нелінійну та лінеаризовану математичну модель стабілізаційного об'єкта. Проведено підбір виконавчих та вимірювальних функціональних елементів. Також були отримані та описані лінеаризовані моделі об'єкта автоматичного керування, визначені передавальні функції окремих елементів системи керування з урахуванням стандартних та зовнішніх впливів, побудовані функціональні та структурні схеми. Був проведений динамічний розрахунок системи позиціонування, синтезований контролер був виведений зі стану, відповідно до вимог технічного завдання були отримані показники якості. Також були вивчені частотні характеристики та система була змодельована у середовищі MATLAB.

Отже, нехай вітрогенератор являє собою прилад з диференціальним приводом - генератора. Варто відзначити, що конструктив доки не має значення, він знадобиться лише в подальшому. На вітродвигуні встановлений блок - джерело енергії, що живить систему. Власне, те, яку потужність буде видавати

генератор на цей блок, і буде визначати характер роботи вітрогенератора. Цей блок разом з вітрогенератором і всіма елементами турбіни називають об'єктом керування. Наше завдання якраз і полягатиме в тому, щоб змусити блок видавати потрібний керуючий сигнал для ефективної роботи вітрогенератора.

Щоб змусити вітрогенератор обертатися з заданою кількістю обертів, необхідно вміти визначати помилку при його обертанні, викликану перешкодами. Для цього можна (і потрібно) оснастити вітрогенератор датчиками, які і будуть вимірювати відхилення значень.

Отже, зворотний зв'язок - це співсюб обліку помилок в керуванні. Здійснюється вона за допомогою датчиків, які ці помилки в керуванні вимірюють.

Проаналізувавши типові закони керування та дослідивши пропорційне керування, пропорційно-диференціальне керування та інтегральне керування, можна зі впевненістю стверджувати, що пропорційно-диференціальне керування забезпечує найкращу швидкодію. Більш того, ПД-регулятор реагує не тільки на величину сигналу помилки, але і на швидкість його зміни, при керуванні досягається ефект попередження (прогнозування поведінки помилки). Недоліками ж ПД-закону може бути обмежена точність і чутливість до різного роду шумів. ПІ-регулятор хороший в сталому режимі. Він максимально точний і не реагує на високочастотні шуми.

Також розібрані правила поводження з вітроенергетичними установками, правилами їх експлуатації та техніка безпеки на при монтажі і технічному обслуговуванні. Щоб умови праці співробітників були безпечними, необхідно дотримуватись наведених норм та правил поведінки на даному підприємстві. Процеси отримання електроенергії при допомозі вітроенергетичних установок пов'язані з небезпекою ураження електричним струмом та травмування від руху механічної частини. Тому необхідно строго дотримуватись технологічного режиму та правил експлуатації зазначених установок відповідно затверджених нормативів та Правил улаштування електроустановок

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альтернативна енергія [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://alternativenergy.ua/vetroenergetika/81-raschet-vetrogeneratora.html>
2. Вітрогенератори все про енергію вітру [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.led.paytex.com.ua/post/vitrogenerator-vse-pro-energiyu-vitru>
3. Позняк Б. А., Юршо Є. Л. «Огляд сучасних вітрогенераторів», Актуальні проблеми енергетики, 2016.
4. Дорф Р., Бішоп Р. Сучасні системи управління: Пров. з англ. Б. І. Копилова. - М.: Лабораторія Базових Знань, 2004. - С. 832.
5. Кривцов В. С. Невичерпна енергія. Кн.1. Вітроенергогенератори: підручник / В. С. Кривцов, А. М. Олійников, А. І. Яковлев. - Х.: Нац. аерокосм, ун-т Харк. авіац. ін-т, Севастополь: Севаст. нац. політ. ун-т, 2003. - С. 400.
6. Г. Півняк. Основи вітроенергетики / Г. Півняк, Ф.Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. – Дніпропетровськ:НГУ, 2015.
7. Математичні основи теорії автоматичного регулювання, т. 2. Вид. 2-ге, дод. За ред. Б.К. Чемоданова. Навч. посібник для вузів. М: Вища. шк., 1977. - 454 с.
8. Відповідна теорія лінійних систем [Електронний ресурс] - <https://ukrayinska.libretexts>.
9. Kaltsev G., Horez R. Iterative technique for tuning PID-regulator. - Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision Making and Governance, 1995, vol. December 3, 13-15, 1995, pp. 3209 - 3210.
10. Denysenko, V. "Nonparametric Model of PID Controller Autotuning" - 18th IEEE International Conference on Control Programs. Part of the 2009 IEEE MultiConference on Systems and Control.
11. Денисенко, В.В. Модификации ПИД-регуляторов // Автоматика и телемеханика, 2010. Т. 72. No 6. С. 345-355.

12. Grassi, E.; Tsakalys K.S. Integrated System Identification and PID Tuning Controller by Forming a Frequency Loop. - Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 2, 1999, p. 1517 - 1522.

13. Guo Q., Wang D., Han P., Yu P. Virtual Cascade PID Controller with High Stability - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2003, Vol. 1, October 5-8, 2003, p. 654-659.

14. Просто о ПИД алгоритмах [Электронный ресурс] - URL: [http://roboforum.ru/wiki/ Translation_article_%22Prosto_o_PIDalgorithmakh%22](http://roboforum.ru/wiki/Translation_article_%22Prosto_o_PIDalgorithmakh%22)

15. Huang Y., Yasunobu S. A practical design method for individual PID control from switching PID control. - Ninth IEEE International Conference on System Security, FUZZ IEEE 2000, pp. 2, 2000, art. 969 – 972.

16. Кучерявий В. Охорона праці: Навчальний посібник. Львів: ОріянаНова, 2007. 368 с.

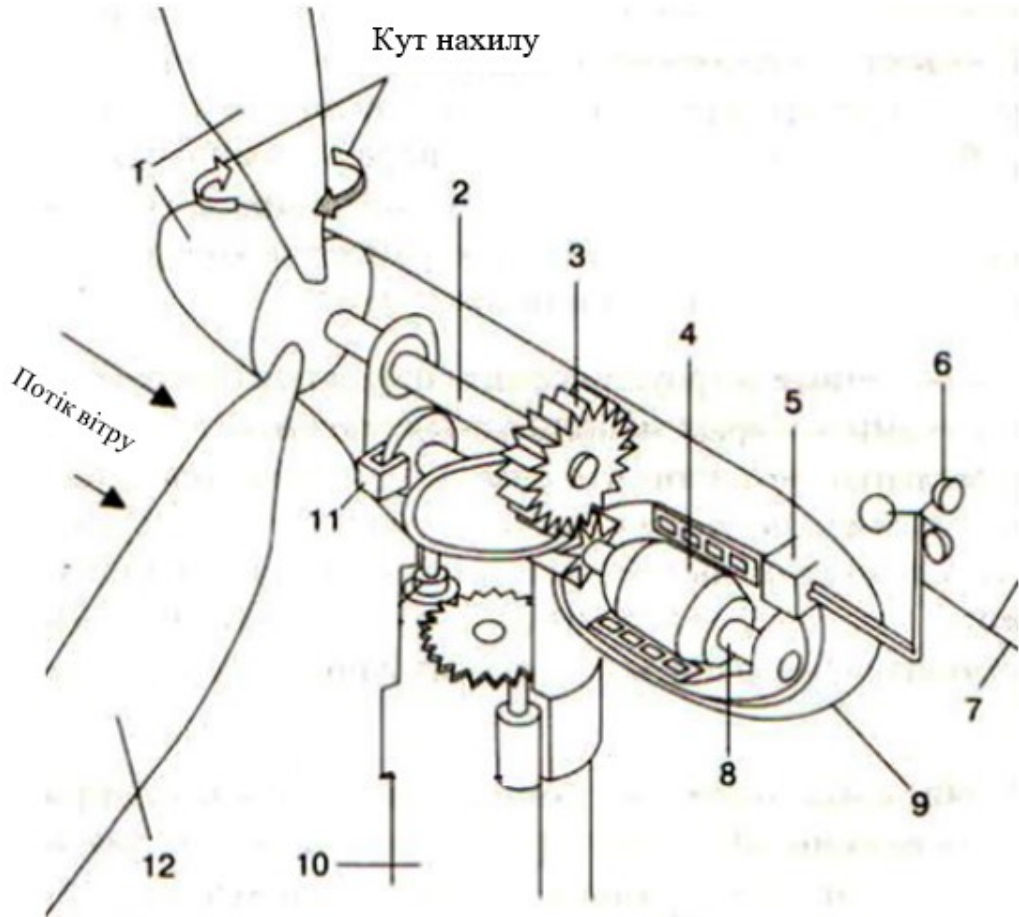
17. Васько В.П. Керування нестационарними режимами роботи вітроустановок промислових вітроелектричних станцій: Дис. канд. тех. наук: 05.14.08./ Київ. - 2003. - 184 с.

18. Правила улаштування електроустановок, видання третє перероблене та доповнене. Київ, Мінпаливенерго України, 2012, 736 с.

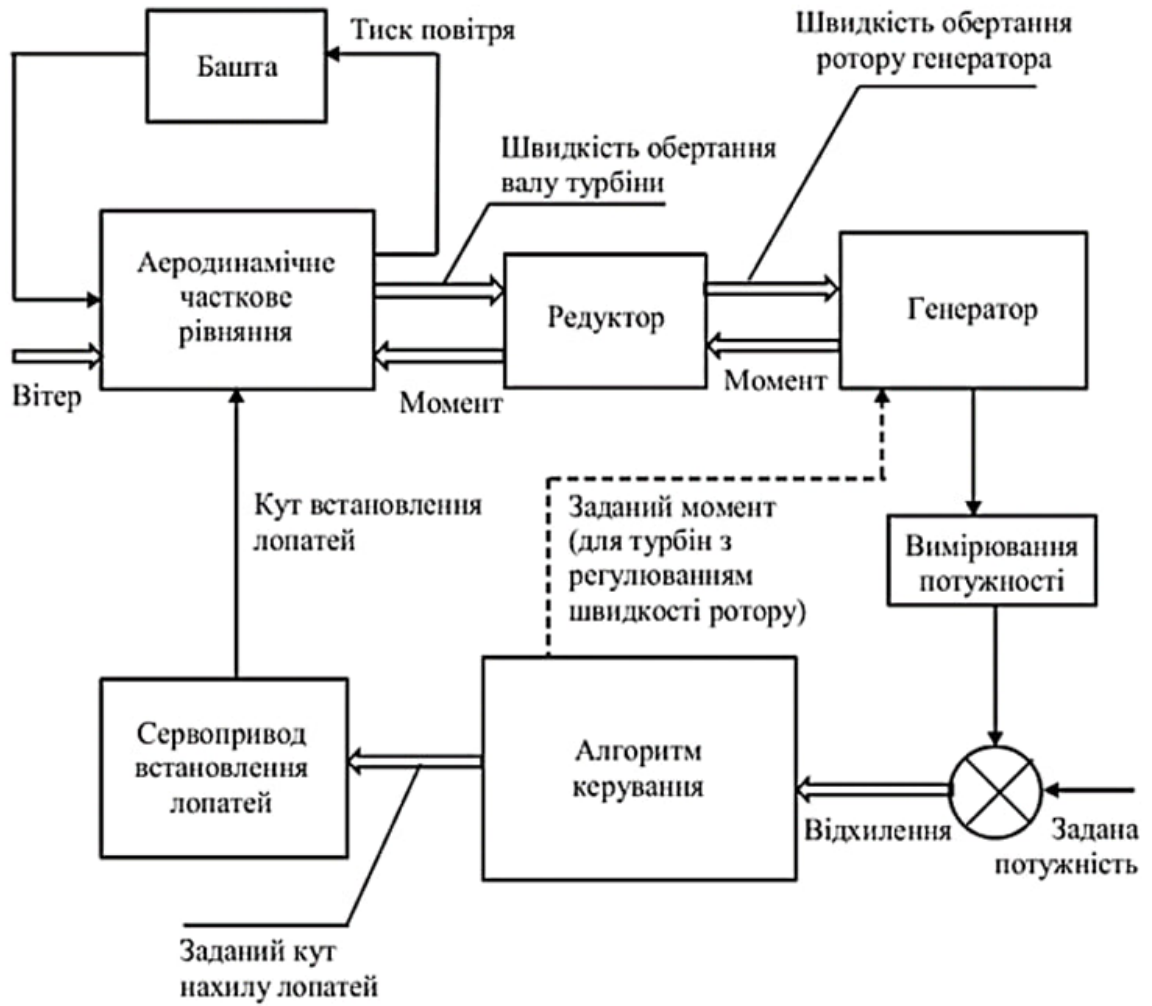
19. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навчальних закладів - За ред. д.т.н., проф. М.П. Гандзюка - К.: Каравела, 2003. - 408 с.

20. ДСТУ ISO 6309:2007. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір. [Чининий від 01 жовтня 2007]. Київ, 2008. 12 с.

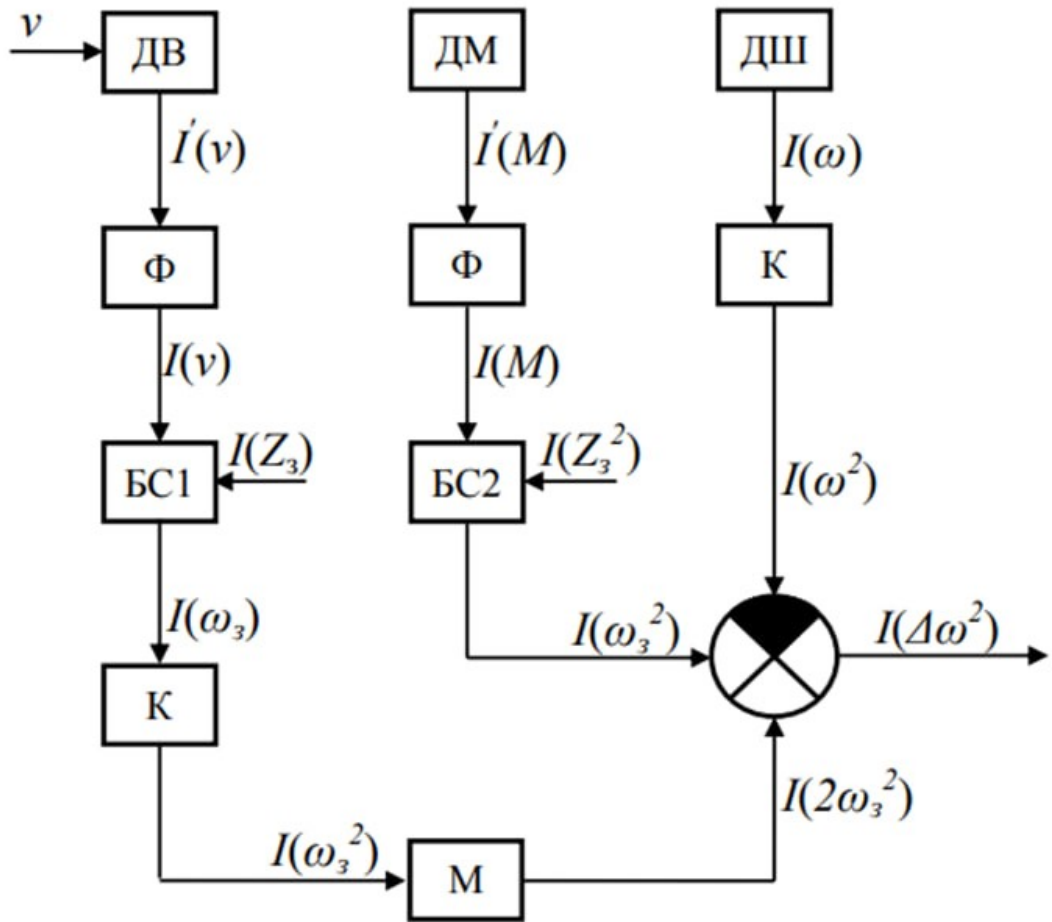
ДОДАТОК А «Конструктивна схема вітроустановки»



ДОДАТОК Б «Загальна структурна схема вітроенергетичної установки»



ДОДАТОК В «Багатоканальна схема управління режимом роботи ВЕУ»



ДОДАТОК Г «Система з ПД-регулятором»

